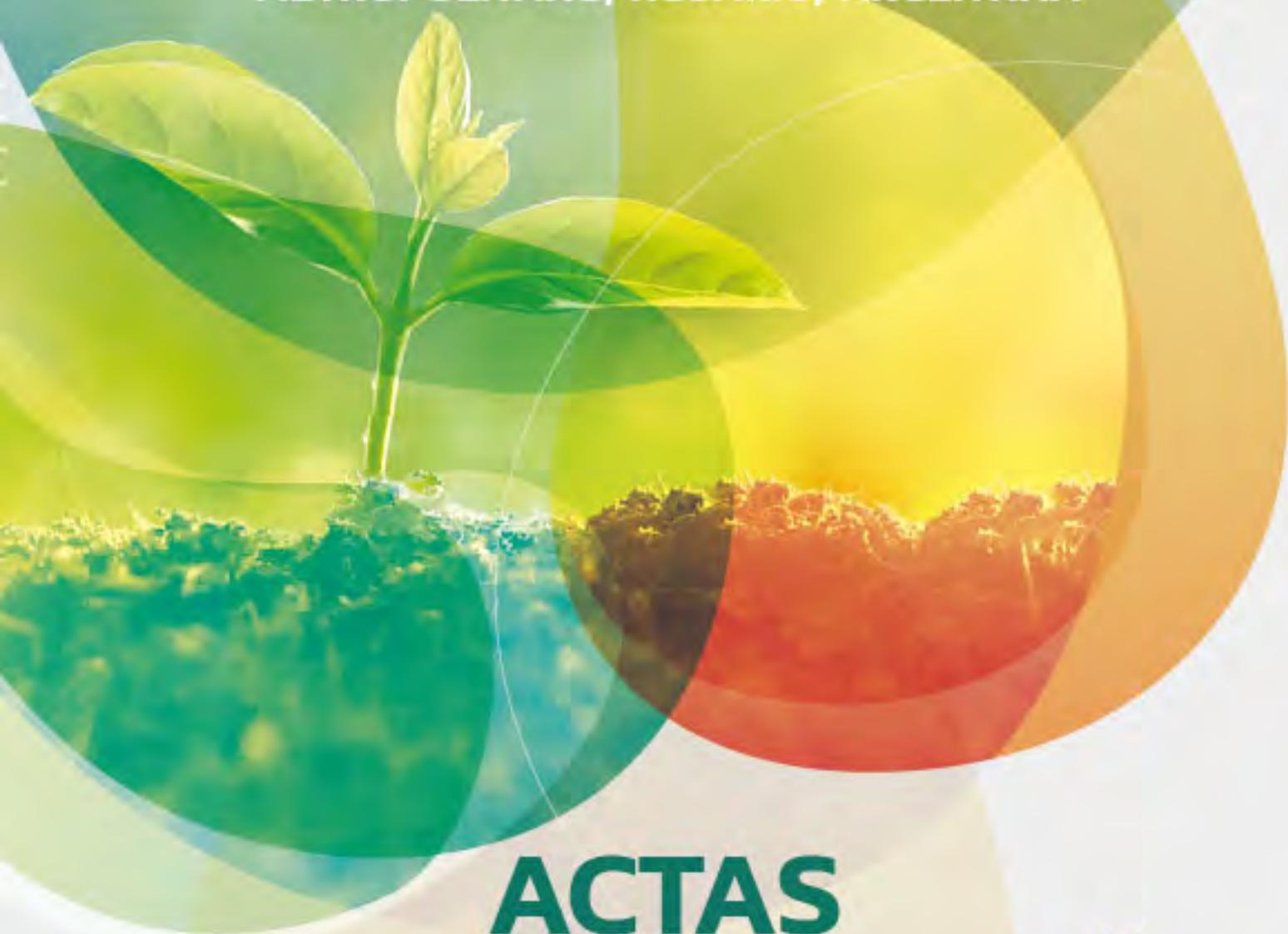




Simposio
Fertilidad 2023
AL GRAN SUELO ARGENTINO ¡SALUD!

10 Y 11 DE MAYO 2023
METROPOLITANO, ROSARIO, ARGENTINA



ACTAS

www.fertilizar.org.ar



FERTILIZAR
ASOCIACION CIVIL

Patrocinantes



Al gran suelo argentino ¡salud!

La Asociación Civil FERTILIZAR tiene el agrado de darles la bienvenida al Simposio “Fertilidad 2023: “Al gran suelo argentino ¡salud!”.

“Al gran suelo argentino ¡salud!” sintetiza y realza nuestro principal objetivo: preservar este recurso natural finito y no renovable, base de la producción de alimentos, fibras y biomateriales a nivel global y fuente de riqueza para nuestro país. El suelo provee más de diez funciones, entre las que se destaca la producción de alimentos: el 95% de los alimentos a nivel global provienen de los suelos.

En el marco del concepto de *Una Salud*, salud del suelo + salud de los cultivos + salud animal + salud humana + salud ambiental, los nutrientes son un componente vital que se transfiere entre los distintos eslabones de esa cadena de salud. Los nutrientes del suelo, capturados y transformados por las plantas, son fuente de alimentos de alto valor disponibles para animales y seres humanos; manejarlos de manera correcta asegura una producción en cantidad y calidad necesaria, no solo para la seguridad alimentaria sino también para el cuidado del ambiente y el bienestar de la sociedad.

Los suelos de la región pampeana argentina han perdido aproximadamente un 50% de su contenido original de materia orgánica y un 66% de los suelos presentan niveles de fósforo extractable por debajo de los umbrales críticos (Sainz Rozas et al., 2019). Asimismo, en los mismos relevamientos, se han observado fuertes caídas en las reservas de cationes y de micronutrientes. La salud de nuestros suelos está comprometida no solo en cuanto a disponibilidad y reserva de nutrientes sino también en cuanto a propiedades físicas, biológicas y químicas, es decir la fertilidad integral de suelos. Estos datos nos plantean un desafío y revelan la imperiosa necesidad de tomar acciones.

El conocimiento de los procesos y mecanismos que intervienen en la dinámica de los nutrientes, considerando el sistema suelo-cultivo, es esencial en la búsqueda de una agricultura sustentable. La ciencia y la tecnología serán claves para cuidar y recuperar la capacidad de nuestros suelos, atendiendo su salud física, química y biológica, mediante el empleo de estrategias y prácticas productivas más sustentables, la reposición de nutrientes y el manejo responsable de este valioso recurso. En ese camino, la incorporación de nuevas tecnologías de procesos e insumos, nos permiten ser más eficientes y efectivos en el manejo de los nutrientes del suelo y los que eventualmente apliquemos.

El Simposio Fertilidad 2023 tiene como objetivo principal presentar y discutir conocimientos e información actualizada en el manejo de los nutrientes para una agricultura sustentable en lo productivo, ambiental y social. A lo largo de dos días, disertantes nacionales e internacionales de reconocida capacidad y trayectoria, compartirán y debatirán aspectos relevantes en cuanto al manejo de suelos y cultivos, y la implementación de los 4 Requisitos de uso responsable de nutrientes: aplicación de fuente correcta en dosis, forma y momento correctos.

Los paneles de presentaciones son los siguientes:

- Conferencia: ¿Hacia dónde debemos pensar nuestra agricultura?
- Brechas de rendimiento: ¿Cuánto explica la nutrición?
- Los cimientos: ¿Por qué insistimos con el manejo responsable de nutrientes en los sistemas de producción?
- Potasio: el macro que amenaza
- Nutrición en la Agricultura Digital
- Fertilizantes minerales + Biofertilizantes + Foliarens ¿todos juntos?
- Para ser mejores agricultores debemos tener mejores sistemas ganaderos
- Nutrientes para sistemas sustentables a nivel regional: ¿Qué hay de nuevo viejo?

Asimismo, se presentan una serie de posters con resultados relevantes de distintas investigaciones realizadas en los últimos años en la región. Los resúmenes escritos de las presentaciones de los paneles y de los posters se incluyen en esta publicación.

Fertilizar A.C. agradece muy especialmente la participación de los distinguidos disertantes de CONICET, Facultad de Agronomía (UBA), Facultad de Agronomía (UNLPam), Facultad de Agronomía (UdelaR, Uruguay), Facultad de Agronomía (UNRC), Facultad de Ciencias Agrarias (UNMdP), Facultad de Ciencias Agrarias (UNNE), Facultad de Ciencias Agropecuarias (UNER), Grupo Agua y Leche (Uruguay), INTA, Kansas State University (EE.UU.), University of Nebraska (EE.UU.) y la actividad privada de Argentina, Brasil y Uruguay.

Como en ocasiones anteriores, nos acompañan instituciones y organizaciones afines a las cuales les estamos profundamente agradecidas: la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACS), la Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa (AAPRESID), el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), la Región Sur de Santa Fe de los grupos CREA, la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Rosario (UNR), la Fundación Producir Conservando, y la Red de Buenas Prácticas Agrícolas. Nuestro agradecimiento a las empresas de servicios e insumos que acompañan el evento y que, fundamentalmente, están comprometidas con el cuidado y preservación de la salud de nuestros suelos.

Rosario, 10 de mayo de 2023

Ing. Agr. María Fernanda González Sanjuan
Gerente Ejecutivo, Fertilizar A.C
mfgonzalez@fertilizar.org.ar

Dr. Fernando O. García
Coordinador Académico
fgarcia1957@gmail.com

Actas Simposio Fertilidad 2023
AL GRAN SUELO ARGENTINO SALUD
Rosario, 10 y 11 mayo 2023

Editor Responsable: Dr. Fernando O. García
Edición y Maquetación: Ing. Agr. María Eugenia Magnelli

Índice

Conferencia	Autores	Pág.
Intensificación sustentable de los sistemas de cultivos: ¿lo esencial es invisible a los ojos?	Patricio Grassini	7
Evaluación de la productividad agrícola en Argentina: brechas de rendimiento en maíz, soja, trigo y girasol	José F. Andrade y colaboradores	9
Brechas de rendimiento: ¿Cuánto se debe a la nutrición y al manejo de suelos?	Nahuel Reussi Calvo, Guillermo Studdert y Fernando García	13
La estructura de cultivo y las brechas de rendimiento en el maíz	Gustavo Maddonni	19
Actualización sobre el manejo responsable de nutrientes en los sistemas agro-productivos de la Argentina	Martín Díaz-Zorita	22
Nutrición de largo plazo en secuencias agrícolas pampeanas	Rouillet, N; Grasso, A; Sacks, M; Ventimiglia, L; Ferraris, G; Faggioli, V; Esposito, G; Quintero, C; Zamora, M; Diaz-Zorita, M	27
Estrategias de fertilización de mediano plazo en sistemas de cultivos extensivos con influencia de napa	Diego Hernán Rotili, Santiago Alvarez Prado, Agustín Barattini, Ignacio Lamattina, Matías Saks, Marcos Gregorini, José Francisco Andrade	33
Potasio en cultivos extensivos del litoral argentino	Juan Orcellet, César Quintero, E. Figueroa, M. Fernanda González Sanjuan y Fernando García	53
La realidad de la historia reciente del potasio en las condiciones agrícolas del Uruguay	Esteban Hoffman, N. Fassana, N. Cortazzo, B. Vega, A. Vulliez, F. Rovegno, M. Van den Dorpel, A. Akerman, F. Leiva, I. Sarli, J.P. Viera, L. Gil y G. Ferreira	58
Cosecha de datos y manejo en la agricultura digital: el nitrógeno como caso de estudio	Laila Puntel	62
Nutrición en la agricultura digital: Hacia una agronomía más cuantitativa	Adrián Correndo, Carlos Hernández, Josefina Lacasa e Ignacio Ciampitti	65
Nutrición Digital Bajada al Suelo	Santiago Tourn Pedro Platz, Emiliano Ladreche, Heber Raggio, Camila Martínez, Santiago Bazterrica y Nicole Cabellier.	66
Aplicaciones y perspectivas del uso de Bioestimulantes y Biorreguladores en agricultura	Antonio Fancelli	69
¿Cómo encajan los biofertilizantes en el modelo de Agricultura 4.0?	Fabrizio Darío Cassán	75
Fertilización o Nutrición Foliar de los Cultivos. El desafío de reducir las dosis de insumos y aumentar la productividad al mismo tiempo	César E. Quintero	77
Fertilizantes de eficiencia mejorada y su uso en agroecosistemas.	Martín Torres Duggan	83
Estabilizadores de nitrógeno: beneficios agronómicos y ambientales de su utilización en cultivos extensivos	Martín Torres Duggan	92
Nutrición eficiente de pasturas para una producción ganadera sustentable	María Alejandra Marino	103
El Sistema Pastoril	Elena Patron	111
Avances en fertilización nitrogenada en maíz en el NEA	Nicolás I. Stahringer, Javier A. Fernández, Suyai Almirón y Andrés Madias	115
Manejo de la fertilización en cultivos de granos en la Región de La Pampa arenosa	Miriam Barraco	130
Nutrición de cultivos en el sudeste de Buenos Aires: avances y desafíos	Guillermo Divito y Juan P. Martínez	135
Nutrientes para sistemas sustentables en la región pampeana central ¿Qué hay de nuevo viejo?	Adrián Rovea, Vanesa Loza y Franco Permingeat	138
Estrategias y manejo para la nutrición de cultivos en zona núcleo Pampeana	Gustavo Ferraris	141
Nutrientes para sistemas sustentables en el Sur de Córdoba	Gabriel Esposito, C. Cerliani y R. Naville	147

Poster	Autores	Pág.
Relevamiento de variables edáficas relacionadas con la salud del suelo en el noreste y noroeste argentino	Hernán Sainz Rozas y colaboradores	148
Módulos de Valoración de Estrategias de Fertilización en Pasturas Pastoreadas. INFORME ACTIVIDADES 2022	M. Alejandra Marino y colaboradores	155
Mapeo digital de propiedades de suelo en la provincia de Córdoba	Mariano Córdoba y colaboradores	164
¿La estrategia de fertilización fosfatada afecta la dinámica del fósforo y su eficiencia de uso en el largo plazo?	Stefania C. Appelhans y colaboradores	169
Fraciones de fósforo y azufre en el suelo en respuesta a la fertilización en distintos suelos del sur de Santa Fe	Micaela M Biassoni y colaboradores	171
Estudio de la interacción entre cultivar, densidad y fertilización nitrogenada en maíz. Fecha de siembra temprana	Gustavo N. Ferraris y colaboradores	176
Estudio de la interacción entre cultivar, densidad y fertilización nitrogenada en maíz. Fecha de siembra tardía	Gustavo N. Ferraris y colaboradores	181
Estrategias de manejo de nitrógeno para reducir las pérdidas por volatilización en maíz bajo condiciones de riego y secano	Paula Iglesias y colaboradores	186
¿Impacta el momento de la fertilización nitrogenada sobre el peso final de los granos de maíz?	Cintia Michelin y colaboradores	191
Monitoreo de la variación espacio-temporal en la humedad de suelo y estatus N en maíz a escala de lote	Nicolás Maltese	196
Fertilización nitrogenada en maíz para silo - mayor rendimiento y calidad	Gonzalo Berhongaray y colaboradores	202
Nanotecnología: desarrollo y pruebas de fertilizantes de última generación	Gonzalo Berhongaray y colaboradores	209
La nutrición de cultivos y su efecto sobre los riesgos de producción: análisis de un experimento de largo plazo en la región pampeana	Luis Manenti y colaboradores	215
Nutrición en la Rotación: Ensayos de la Región CREA Córdoba Norte	María Lourdes Cornavaca y colaboradores	223
Intensificación sustentable y respuesta a la fertilización nitrogenada en una secuencia vicia-cebada/maíz de segunda	Cecilia Crespo y colaboradores	237
Análisis del uso de vicia previo al maíz en el sudeste bonaerense	F. Cafaro La Menza y colaboradores	239
Economía del nitrógeno en el maíz luego de diferentes cultivos de servicio	Salvador Prieto Angueira y colaboradores	242
¿Puede la vicia como cultivo de cobertura previo a soja contrarrestar la limitación de N en soja de alto rendimiento?	Fernando Salvagiotti y colaboradores	246
El rendimiento potencial de la soja en Argentina depende de la nutrición biológica de nitrógeno.	Carlos Fabián Piccinetti y colaboradores	248
Efecto de la inoculación con <i>Azospirillum spp</i> en <i>Triticum aestivum</i> . L	Julieta Canchero y colaboradores	250
Reducción de la fertilización química en trigo por medio de la inoculación con <i>Azospirillum argentinense</i>	Daniela Vallejo y colaboradores	251
Eficiencia agronómica y minería genómica de propiedades PGPR de la bacteria rizosférica biostimulante de trigo <i>Pseudomonas pergaminensis</i>	Marisa Díaz y colaboradores	254
Diagnóstico de la deficiencia azufrada en cebada cervecera basado en el análisis vegetal	Federico M. Gómez y colaboradores	260
Fertilización de verdeos invernales con énfasis en avena	Juan Pautasso y colaboradores	266
Incrementos en la eficiencia en el uso del nitrógeno disminuyen las emisiones de óxido nitroso, pero pueden penalizar el rendimiento de la caña de azúcar	Jorge Chalco Vera y colaboradores.	273

Intensificación sustentable de los sistemas de cultivos:

¿lo esencial es invisible a los ojos?

Dr. Patricio Grassini

Profesor de Agronomía, Universidad de Nebraska-Lincoln

Uno de los desafíos más importantes que tiene la humanidad al año 2050 es el de aumentar la producción de los cultivos para satisfacer la creciente demanda de alimentos, forrajes, fibra, y biomateriales, minimizando el impacto ambiental. No estamos, sin embargo, en una trayectoria sustentable, ya que las tasas anuales a las cuales aumentan los rendimientos de los principales cultivos no son lo suficientemente altas para satisfacer la demanda futura de alimentos en la tierra que actualmente es cultivada. No genera sorpresa, entonces, que las últimas dos décadas se hayan caracterizado por precios de granos altos y volátiles y una aceleración en la expansión de la tierra cultivada: alrededor de 13 millones de hectáreas por año son incorporadas a la agricultura, en muchos casos a expensas de ecosistemas naturales y en zonas no aptas para la producción de cultivos.

En ese contexto es importante renovar los esfuerzos para promover una *intensificación sustentable* de los sistemas de producción de cultivos, a través de un aumento de los rendimientos en las áreas que son actualmente cultivadas, de una manera rentable, y minimizando los efectos adversos en el medio ambiente. Mientras que abunda el debate alrededor de las opciones (de diverso nombre e ideología) que podrían contribuir (o no) a la intensificación sustentable, hay relativamente poca discusión en definir la 'tierra prometida' a la cual la agricultura debería aspirar con metas objetivas y medibles. Focalizar la discusión primero en definir metas, en vez de prácticas específicas e ideologías, ayudaría luego a evaluar e identificar opciones con más probabilidad de contribuir a alcanzar el nivel de intensificación sustentable deseado. Asimismo,

dada la magnitud y urgencia del desafío que tenemos por delante, es prudente que la priorización de inversiones en investigación y desarrollo agrícola sean sensibles a la escala temporal y espacial asociada al potencial impacto de las diferentes opciones.

Como una aproximación pragmática para alcanzar las metas de intensificación sustentable, aquí planteamos dar prioridad a prácticas de manejo agronómico, agnósticas en cuanto a ideologías y basadas en nuestro conocimiento de la fisiología de los cultivos y la captura de los recursos, que sirvan para reducir la brecha entre el rendimiento potencial y el promedio actual de los productores, y que minimicen el impacto ambiental negativo, con foco en regiones donde la brecha y/o el impacto ambiental negativo sean substanciales. Dicha aproximación tiene una alta probabilidad de generar un alto retorno a las inversiones en investigación y desarrollo en agricultura, contribuyendo a las metas de intensificación sustentable en un marco de tiempo razonable y a una escala espacial relevante.

Mi presentación ilustra oportunidades de intensificación sustentable usando casos de estudio alrededor del mundo, incluyendo Argentina, haciendo énfasis en prácticas de manejo agronómico que están en frente de nuestros ojos, y que son efectivas para incrementar el rendimiento de una manera rentable y compatibles con las aspiraciones de asegurar la sustentabilidad de los sistemas agrícolas a largo plazo y preservar el medio ambiente para las generaciones futuras.

Literatura usada como base para la presentación

- Cassman KG, Grassini P (2020) A global perspective of sustainable intensification research. *Nature Sustainability* 3, 262-268.
- Andrade J, Mourtzinis S, Rattalino Edreira JI, Conley SP, Gaska J, Kandekele HJ, Lindsey LE, Naeve S, Nelson S, Singh MP, Thompson L, Specht JE, Grassini P (2022) Field validation of a farmer-data approach to close soybean yield gaps in the US North Central region. *Agricultural Systems* 200, 103434.
- Rizzo G, Monzón JP, Tenorio FA, Howard R, Cassman KG, Grassini P (2022) Climate and agronomy, not genetics, underpin recent maize yield gains in favorable environments. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)* 119, 44 e2113629119.
- Monzón JP & Grassini P (2022) La nutrición de los cultivos para achicar las brechas de rendimiento.

- Congreso Fertilizar, 2021. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=_ZyHULM7YPk
- Monzón JP, Lim YL, Tenorio FA, Farrasati R, Pradiko I, Sugianto H, Donough CR, Rattalino Edreira JI, Rahutomo S, Agus F, Slingerland MA, Zijlstra M, Saleh S, Nashr F, Nurdwiansyah D, Ulfaria N, Winarni NL, Zulkhakim N, Grassini P (2023) Agronomy explains large yield gaps in smallholder oil palm fields. *Agricultural Systems* (accepted)
- Rizzo G, Agus F, Batubara SF, Andrade JF, Rattalino Edreira JI, Purwantomo DKG, Anasiru RH, Maintang, Marbun O, Ningsih RD, Syahri, Ratna BS, Yulianti V, Istiqomah N, Aristya VE, Howard R, Cassman KG, Grassini P (2023) A farmer data-driven approach for prioritization of agricultural research and development: A case study for intensive crop systems in the humid tropics. *Field Crops Research* 297, 108942.

Evaluación de la productividad agrícola en Argentina Brechas de rendimiento en maíz, soja, trigo y girasol

José F. Andrade¹ y colaboradores
¹FAUBA

Introducción

En la última década, los análisis de brechas de rendimiento se han difundido debido a su capacidad para identificar el potencial de mejora en la producción agrícola y enfocar los estudios agronómicos en áreas específicas donde se encuentran brechas amplias. En este estudio, hemos utilizado una metodología basada en modelos de simulación de cultivos y datos reales de producción para estimar la brecha existente entre el rendimiento potencial y el rendimiento real alcanzado en las principales zonas productoras de soja, maíz, girasol y trigo en Argentina, un enfoque que ha sido aplicado en más de 70 países en todo el mundo (<http://www.yieldgap.org>).

El potencial de rendimiento (Y_p) de un cultivar bien adaptado está determinado por la concentración de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico, la temperatura y la radiación solar en ausencia de limitaciones de agua, nutrientes, malezas, patógenos e insectos (Evans, 1993). Para cultivos de secano, el suministro de agua y las propiedades del suelo que influyen en el balance hídrico del cultivo determinan el potencial de rendimiento limitado por el agua (Y_w). Los rendimientos promedio en campos de productores suelen estar muy por debajo de Y_p (o Y_w) debido a factores que limitan y reducen el rendimiento, como la deficiencia de nutrientes, la competencia de malezas y el daño causado por insectos y enfermedades (van Ittersum y Rabbinge, 1997; Cassman, 1999). La diferencia entre Y_p (o Y_w) y el rendimiento del productor se conoce como brecha de rendimiento (Y_g). Como referencia, un productor con buen acceso a insumos, mercados y conocimientos técnicos podría alcanzar entre el 70 y 80% del Y_p (o Y_w) (Cassman et al., 2003). Más allá de este nivel, sería difícil lograr incrementos de rendimiento de manera rentable con las tecnologías existentes.

En este estudio, nuestro objetivo ha sido ampliar y actualizar la versión anterior de estudio de brechas de rendimiento realizada en

Argentina (Aramburu Merlos et al., 2015), incluyendo:

- Nuevos sitios de estudio, tanto en la frontera agrícola como en la zona núcleo de producción.
- Actualización de resultados en estaciones ya existentes.
- Inclusión del cultivo de girasol.
- Análisis discriminado en cultivos de maíz y soja según el tipo de planteo de producción (es decir, maíz temprano o tardío y soja de primera o de segunda).
- Estimación de área de influencia de napa y su efecto sobre los rendimientos simulados.

Metodología

El proyecto 'Global Yield Gap Atlas' (GYGA; <http://www.yieldgap.org>) utiliza un conjunto de pasos estandarizados para determinar las brechas de rendimiento. En primer lugar, se evalúa la distribución espacial de la superficie cosechada de cultivos. En este estudio utilizamos información espacial provista por GeoINTA y SPAM para los cultivos de maíz, soja, trigo y girasol en Argentina. Estos mapas se superponen a zonas climáticas (CZ) previamente definidas que comparten características climáticas similares, como el índice de aridez, la estacionalidad de las temperaturas y la suma térmica acumulada (van Wart et al., 2013). El siguiente paso consiste en identificar las CZ que cubren al menos 5% del total de la superficie nacional cosechada de cada uno de los cultivos estudiados y seleccionar estaciones meteorológicas dentro de esas zonas (Figura 1). Para tal fin, se utilizaron dos redes de estaciones meteorológicas: INTA y SMN, de las que se obtuvieron datos meteorológicos diarios para los últimos 30+ años, incluyendo temperatura máxima y mínima diaria y precipitación. Para complementar los datos de las estaciones meteorológicas, se utilizó NASA-POWER como fuente de datos de radiación solar incidente, ya que en la mayoría de las estaciones meteorológicas faltaban mediciones diarias de radiación solar.

Para seleccionar las estaciones meteorológicas se considera que el área de influencia que abarca un radio de 100 km alrededor de la estación, recortando esta área por los bordes de las CZ. Esta área alrededor de las estaciones meteorológicas se denomina 'buffer' y se seleccionan las que contienen más del 1% del área cosechada nacional para el cultivo en cuestión. En total, se seleccionaron 32 (maíz y soja), 26 (trigo) y 11 (girasol) buffers en función de la distribución del área de cultivo cosechada (Figura 2). El conjunto de buffers seleccionados para llevar adelante el estudio representa más del 70% del total de la superficie cosechada para cada uno de los cuatro cultivos, mientras que las CZ en las que se encontraban estos buffers representan al menos el 85% del área nacional. En resumen, el objetivo de este procedimiento estandarizado de GYGA es obtener datos de alta calidad y confiables para estimar las brechas de rendimiento en diferentes cultivos en una determinada región.

Las series de suelos dominantes en cada zona buffer se seleccionaron utilizando datos proporcionados por la División de Suelos de INTA. Para ello, se siguió un procedimiento de dos pasos: primero, se utilizaron mapas nacionales de suelos (1:50,000 o 1:500,000) para calcular el área de todas las series de suelos dentro de la zona de amortiguamiento. En segundo lugar, se seleccionaron 2-3 series de suelos dominantes para las simulaciones de cultivos en base al área relativa dentro de la zona buffer, la idoneidad del uso de la tierra y la preferencia de los agricultores por ciertas series de suelos para el cultivo de una determinada especie (por ejemplo, el maíz se cultiva típicamente en los mejores suelos). Los datos de suelo necesarios para las simulaciones de cultivos, como la profundidad del suelo, el valor de curva número de escorrentía, los límites inferior y superior para la retención de agua, etc., se derivaron de las descripciones de las series de suelos según Gijsman et al. (2003) y Dardanelli et al. (2003). La profundidad de enraizamiento se estableció en 2,4 m, basándose en Dardanelli et al. (1997, 2003), excepto para seis ubicaciones (Coronel Suarez, Tres Arroyos, Balcarce, Tandil, Azul y La Dulce) donde la profundidad de enraizamiento es limitada por una capa de tosca.

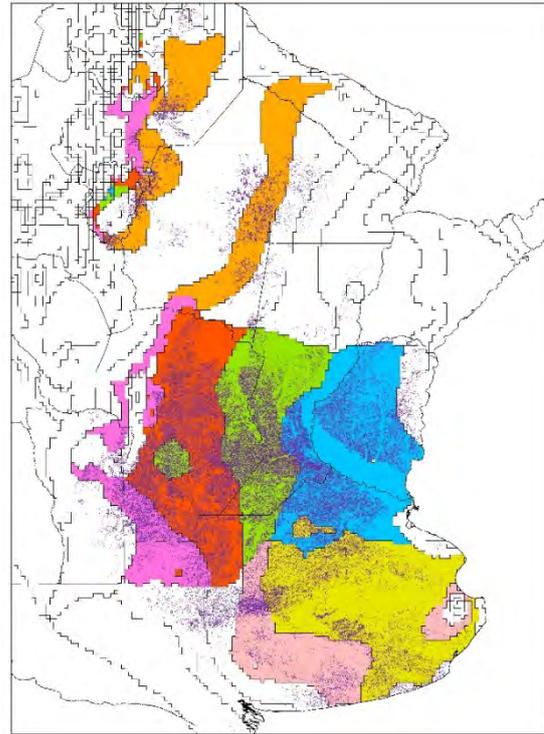


Figura 1. Zonas climáticas seleccionadas para maíz y soja (áreas coloreadas). Los pixeles coloreados reflejan el área de cultivo de soja en la campaña 2018/19 (GeoINTA).

Otro de los inputs necesarios para llevar adelante las simulaciones es la información del manejo a nivel sistema de cultivo. Esta se obtuvo consultando a especialistas locales (asesores, investigadores, extensionistas de diversas instituciones). Se solicitó información sobre las rotaciones de cultivos dominantes, las fechas de siembra más frecuentes, cultivares dominantes, y la densidad de siembra habitual y óptima. Los datos proporcionados fueron posteriormente corroborados por otros expertos locales y nacionales.

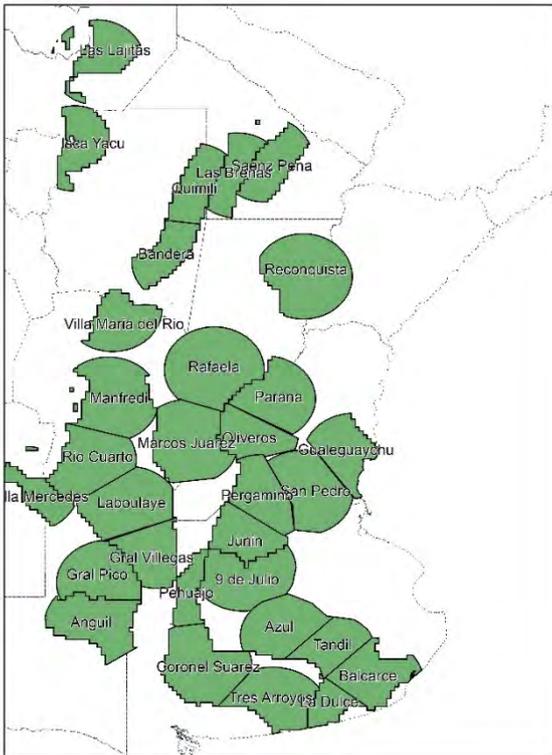


Figura 2. Zonas buffers seleccionadas para maíz y soja dentro de las zonas climáticas previamente seleccionadas. Asimismo, algunos buffers adicionales fueron incluidos en el análisis a pesar de encontrarse fuera de las zonas climáticas elegidas (por ejemplo, Anguil y Reconquista).

Se realizaron simulaciones de cultivares de uso general para cada buffer utilizando los modelos de maíz (CERES), trigo (CERES), girasol (CROPGRO) y soja (CROPGRO) incrustados en DSSAT v 4.7 (Jones et al., 2003; Hoogenboom et al., 2019) para un periodo de 20+ años (2000-2021). Los coeficientes genéticos fueron previamente derivados y validados por Monzón et al. (2007, 2012) y Rodríguez et al., (en revisión) en base a datos de experimentos de secano e irrigados. Para tener en cuenta las diferencias en el agua del suelo inicial en el momento de la siembra entre años, se simuló toda la secuencia de cultivos, asumiendo el 50% de agua del suelo disponible en el primer año de la serie, mientras que las campañas sucesivas tomaron el valor de agua disponible al final del cultivo antecesor y considerando las precipitaciones ocurridas durante el periodo de barbecho. En los buffers donde se incluyeron trigo, maíz y soja se simuló una rotación típica de ‘tercios’ compuesta por soja-trigo/soja de segunda-maíz. En todos los buffers se consideraron dos variantes para el maíz, fecha temprana (típicamente septiembre) y tardía (diciembre). Luego se asignó un peso relativo a cada planteo por región según

información recopilada por la Bolsa de Cereales de Buenos Aires. En los buffers donde no se reportó una superficie relevante de trigo (ej., regiones NOA y NEA), se simuló una rotación soja-maíz, con maíz solo en fecha tardía (diciembre o incluso principios de enero). Además, en los buffers donde se incluyó girasol, también se simuló la rotación girasol-trigo/soja-maíz (La Pampa y Sur de Buenos Aires) con fecha de siembra de girasol en octubre. Mientras que en NEA se utilizaron dos rotaciones adicionales, una con fecha de siembra normal en girasol (fines de septiembre) girasol-maíz-soja (un cultivo por año) y otra con fecha de siembra temprana de girasol (10 de agosto) seguido de maíz en la misma campaña en una secuencia compuesta por girasol/maíz-soja (tres cultivos en dos años). Por último, se obtuvieron datos a nivel de distrito sobre el área de cultivo cosechada y los rendimientos promedio de cada cultivo del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de la República Argentina (<https://www.magyp.gob.ar/datosabiertos/>). Se utilizaron estadísticas de las últimas 8 temporadas de cultivo disponibles (2013/14 a 2020/21) para calcular los rendimientos promedio en cada buffer.

Resultados

Los resultados de estimación de brechas de rendimiento se encuentran en etapa de revisión final y serán presentados durante el Simposio Fertilidad 2023.

Referencias

- Cassman, K. G. 1999. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 96: 5952-9.
- Dardanelli, J.L., Bachmeier, O.A., Sereno, R., Gil, R., 1997. Rooting depth and soil water extraction patterns of different crops in a silty loam Haplustoll. *Field Crops Res.* 54, 29-38.
- Dardanelli, J.L., Calmon, M.A., Jones, J.W., Andriani, J.M., Diaz, M.P., Collino, D.J., 2003. Use of a crop model to evaluate soil impedance and root clumping effects on soil water extraction in three Argentine soils. *Trans. ASAE* 46, 1265-1275.
- Evans, L. T. 1993. *Crop Evolution, Adaptation and Yield.* Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Gijsman, A.J., Jagtap, S.S., Jones, J.W., 2002. Wading through a swamp of complete confusion: how to choose a method for estimating soil water retention

- parameters for crop models. *Eur. J. Agron.* 18, 75–105.
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., Ritchie, J.T., 2003.** The DSSAT Cropping System Model. *Eur. J. Agron.* 18: 235–265.
- Monzon, J.P., Sadras, V.O., Abbate, P.A., Caviglia, O.P., 2007.** Modelling management strategies for wheat-soybean cropping systems in the Southern Pampas. *Field Crops Res.* 101, 44–52.
- Monzon, J.P., Sadras, V.O., Andrade, F.H., 2012.** Modelled yield and water use efficiency of maize in response to crop management and Southern Oscillation Index in a soil-climate transect in Argentina. *Field Crops Res.* 130, 8–18.
- van Ittersum, M. K., and R. Rabbinge.** 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research* 52: 197–208.
- van Wart, J., L. G. J. van Bussel, J. Wolf, R. Licker, P. Grassini, A. Nelson, H. Boogaard, J. Gerber, et al.** 2013. Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. *Field Crops Research* 143: 44–55.

Brechas de rendimiento: ¿Cuánto se debe a la nutrición y al manejo de suelos?

Reussi Calvo, N.I.^{1,2*}; Studdert, G.A.¹; García, F.O.^{1,3}

¹Facultad de Ciencias Agrarias (UNMdP), ²CONICET, ³Consultor.

*Ruta 226 km 73,5 (7620) Unidad Integrada Balcarce, Buenos Aires. nahuelreussicalvo@mdp.edu.ar

Los rendimientos de los principales cultivos extensivos de Argentina y, por ende, la **demand** de nutrientes se ha incrementado en los últimos 20 años. La tasa de crecimiento de la producción total de granos alcanzó 4,17 M t por año debida a la mayor participación del cultivo de maíz en el escenario agrícola (Satorre y Andrade, 2021). Sin embargo, en la actualidad existe una brecha entre los rendimientos actuales y los alcanzables en secano. Estas brechas, del 35 al 50% (Andrade, J. comunicación personal), se deberían a múltiples causas, desde la salud del suelo y su manejo hasta las prácticas de manejo del cultivo.

La falta de rotaciones con pasturas y/o la disminución de la frecuencia de gramíneas en la rotación, sumado al bajo uso de fertilizantes, han producido una notable disminución de los niveles de materia orgánica (MO) de los suelos de la Región Pampeana y, por lo tanto, la **oferta natural de nutrientes**. De esta forma, dependiendo del tipo de suelo y textura, hoy en día solo se presenta el 50% del nivel original de MO (Sainz Rozas et al., 2011). Los balances de nutrientes en los cultivos han sido históricamente negativos en Argentina, es decir, la remoción en granos supera a la aplicación. Esto ha generado **brechas de nutrientes**, definida como la diferencia entre los nutrientes aplicados y aquéllos necesarios para lograr los rendimientos alcanzables, de diferente magnitud según zona, lote y/o ambiente (Figura 1).

Las respuestas a la aplicación de nutrientes deficientes, en general nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S), varía con el estado de salud del suelo (Figura 2). Se podrían definir tres escenarios de salud de suelo que afectarían diferencialmente las respuestas a los nutrientes, y se podrían relacionar con los años de agricultura continua.

Escenario 1: Suelos con buena salud edáfica, la aplicación de nutrientes podría mejorar los rendimientos y la brecha de nutrientes se relacionaría con la disponibilidad de nutrientes. La eficiencia de uso de los nutrientes en esta situación es máxima.

Escenario 2: Suelos con degradación intermedia o parcial (i.e., compactaciones), la aplicación de nutrientes podría contribuir a disminuir los efectos negativos de condiciones inadecuadas para el crecimiento de raíces y reducir las brechas de rendimiento. Para que esto suceda, es necesario realizar acciones para revertir/solucionar los problemas de salud del suelo no asociados con fertilidad química (ej. control del tránsito, rotación con gramíneas, cultivos de servicios).

Escenario 3: Suelos severamente degradados, por erosión, compactación, salinización, pérdida de biodiversidad u otros, donde la aplicación de nutrientes tendría bajo impacto en reducir la brecha de rendimientos.



Figura 1. Esquema conceptual de la relación entre la oferta y demanda de nutrientes en Argentina en los últimos 50 años. Las estrellas indican a modo de ejemplo las brechas de nutrientes para diferentes zonas del país (Elaborado en base a Sainz Rozas et al., 2011 y Satorre y Andrade, 2021).

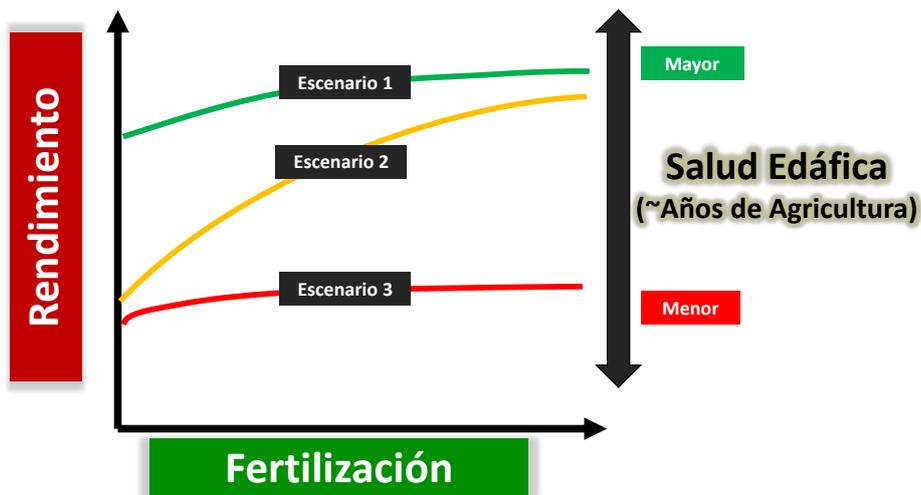


Figura 2. Esquema conceptual de la relación entre el rendimiento de los cultivos en función de los niveles de fertilización para suelos con diferente estado de salud del suelo (Adaptado de Tiftonell y Giller, 2012).

Entonces, en función de las **Figuras 1 y 2** nos podemos preguntar, ¿la brecha de nutrientes aumenta con los años de agricultura? A partir del análisis de la información generada por los ensayos de larga duración realizados en la Unidad Integrada Balcarce (Studdert, 2017), se estimó que la brecha de nutrientes se incrementó en forma lineal con los años de agricultura continua (desde 0 a 15 años) a una tasa promedio de 2,8% año⁻¹ en sistemas de labranza convencional y 4,4% año⁻¹ en siembra directa (**Figura 3**). Este comportamiento se podría asociar con un **Escenario 1** (**Figura 2**) porque durante el período bajo estudio no se alcanzaron niveles de degradación física que limitaran la posibilidad de respuesta. No obstante, en los mismos

experimentos, la estabilidad de agregados (indicador de salud física de suelos) disminuyó de manera exponencial con los años de agricultura, particularmente en los primeros 5 años (**Figura 4**). Varios trabajos han demostrado un incremento de la respuesta en rendimiento al agregado de nutrientes con el aumento en los años de agricultura (Studdert, 2017; Ernst et al., 2018). Además, Ernst et al. (2016) y Tourn et al. (2019) observaron un mayor deterioro de la calidad física del suelo con el incremento de la proporción de cultivos anuales en la rotación. Esto indicaría que en el largo plazo el **Escenario 1** podría tender al **Escenario 2** (y en el peor de los casos, al **Escenario 3**) si a la aplicación de nutrientes no se la acompaña con otras prácticas

de manejo para evitar el empeoramiento de la salud física de los suelos.

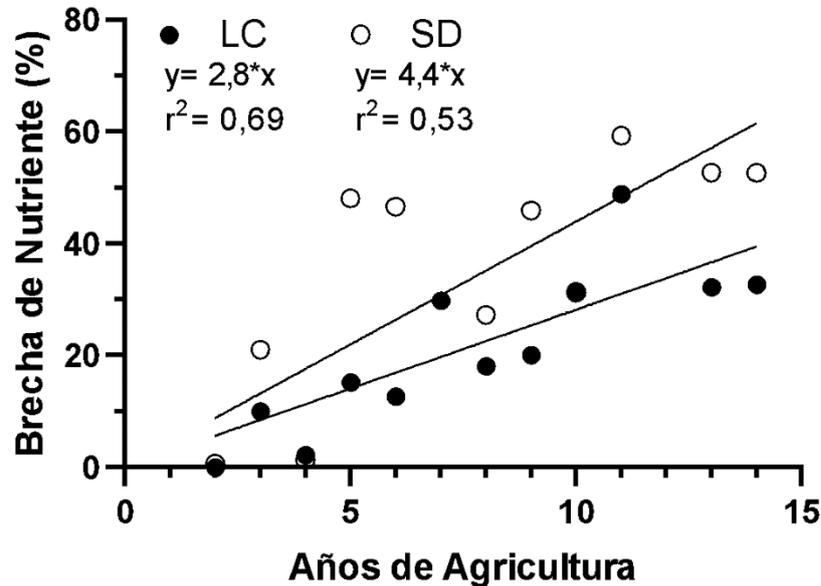


Figura 3. Brecha de nutriente en función de los años de agricultura bajo siembra directa (SD) y labranza convencional (LC). Elaborado con base de datos de ensayos de larga duración-Unidad Integrada Balcarce. (Elaborado de Studdert, 2017).

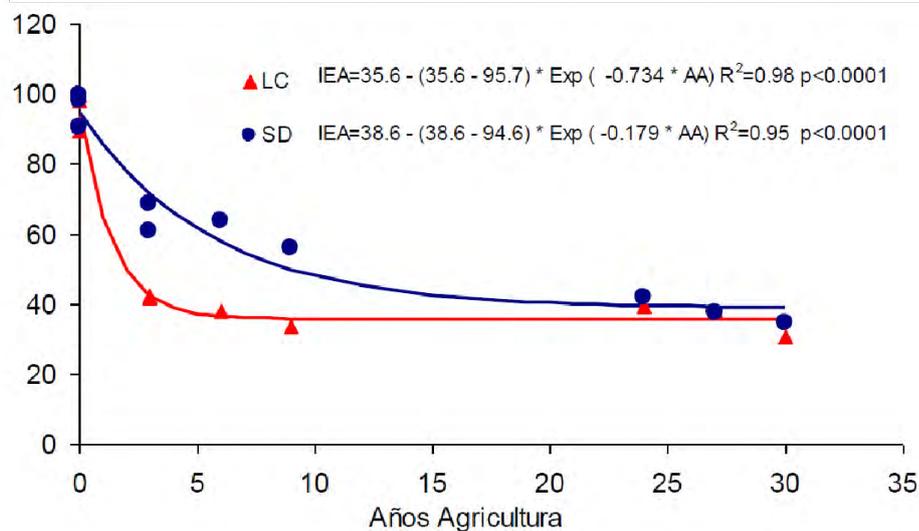


Figura 4. Estabilidad de agregados en función de los años de agricultura bajo siembra directa (SD) y labranza convencional (LC) (Fuente: Domínguez et al., 2008).

En la actualidad, la mayor parte de los lotes bajo producción agrícola de la Argentina presentan más de 15 años de agricultura (posible **Escenario 2**, Figura 2). En estas condiciones, investigaciones realizadas en ensayos en distintas zonas del país demostraron que la nutrición balanceada con NPS contribuye desde un 15% hasta un 47% de los rendimientos de soja, maíz o trigo (Figura 5). Sin embargo, como se

mencionó, los balances de nutrientes en los cultivos han sido históricamente negativos en Argentina. Frente a esta situación, trabajos recientes proponen que la reposición de los niveles de N, P y S que se llevan los cultivos en grano permitirían reducir las brechas de rendimiento explorable. Esto se fundamenta en validaciones realizadas a nivel de lote de producción para maíz (n= 44), trigo (n=50) y soja (n=117), donde se compararon la dosis actual de

nutrientes utilizada por el productor vs una fertilización de reposición. La respuesta promedio de rendimiento fue de 15% en maíz, 22% en trigo y 13% en soja (Monzón, comunicación personal). En línea con lo mencionado, ensayos de larga duración con fertilización de reposición acompañado de un cambio de la rotación hacia una intensificación con maíz-trigo/soja en el sudeste de Córdoba (Gudelj et al., 2017), muestran incrementos en el tiempo en el rendimiento de los tratamientos fertilizados, contribuyendo a la reducción de la brecha explorable luego de 10 años de nutrición balanceada (Figura 6). No obstante, la pregunta que surge de los mismos es si esto se debe a solo un efecto directo de la nutrición. A partir de la información de los mismos experimentos, se determinó que la nutrición por reposición junto a una rotación más adecuada tendió a mejorar la estabilidad de agregados con el tiempo (Figura 7), lo cual se explicaría por mejoras en el contenido de materia orgánica del suelo. Esto sugiere que, para las condiciones de un *Escenario 2*, la reducción de la brecha de rendimiento será explicada en mayor medida por el efecto combinado de la disponibilidad de nutrientes y la mejora de la salud edáfica. Otros autores han determinado que la aplicación de nutrientes (específicamente N) en una dosis óptima agronómica permite no solo maximizar el rendimiento en grano y el aporte de residuo sino también fijar más carbono; mientras que dosis excesivas (superiores al óptimo económico), resultan externalidades negativas como menor fijación de carbono y contaminación de suelos, aire y aguas (Poffenbarger et al., 2017- Figura 8).

Respecto al *Escenario 3*, trabajos realizados en Brasil y África muestran ejemplos de suelos degradados en los cuales no se observan respuestas a nutrientes (Tittonell y Giller, 2012). Este escenario podría ser cada vez más frecuente en los lotes bajo producción de la región pampeana Argentina. Se estima que un 30% del territorio argentino (unas 100 millones de ha) está afectado por erosión hídrica y eólica (Casas y Damiano, 2019) lo que lleva a una degradación muy difícilmente reversible. Según estos estudios, el deterioro registra una tasa de crecimiento de 200.000 ha por año.

En síntesis, buscando satisfacer una demanda creciente, reducir las brechas de rendimiento es un objetivo central. La “brecha de nutrientes” sería responsable de una buena parte de la brecha de rendimientos. Sin embargo, para la mayor parte de los suelos bajo producción en la región pampeana, la reducción de la brecha de rendimiento sería explicada por el efecto combinado de la disponibilidad de nutrientes y la mejora de la salud edáfica. Si buscamos una agricultura eficiente y efectiva de bajo impacto ambiental, la variabilidad de condiciones de suelo y disponibilidad de nutrientes y de manejo de suelos y de cultivos requiere de análisis y ajustes a escalas detalladas y con indicadores robustos. Finalmente, debe tenerse en cuenta que las necesidades de nutrientes pueden cubrirse con fertilizantes minerales, abonos orgánicos, bioinsumos y reciclados y a partir del manejo correcto del suelo que permita a los cultivos nutrirse en cantidad, tiempo y forma.

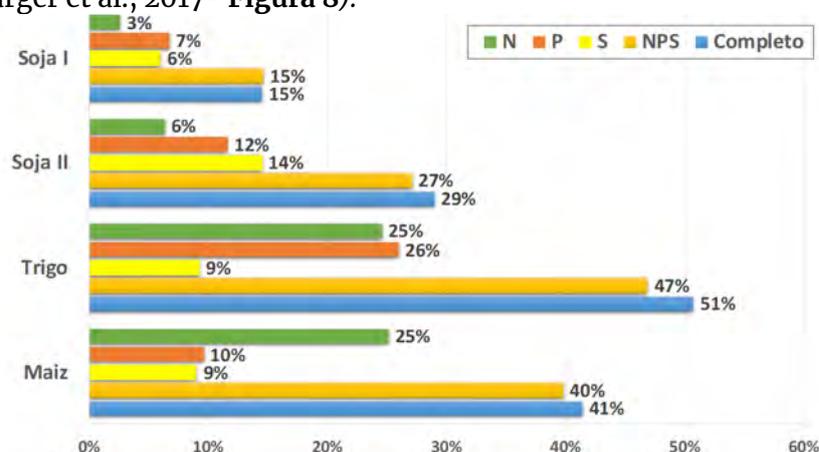


Figura 5. Contribución de la fertilización con nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S), NPS y NPS más micronutrientes (Completo) al rendimiento de diferentes cultivos (Fuente: Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe, CREA Sur de Santa Fe-IPNI-Nutrien).

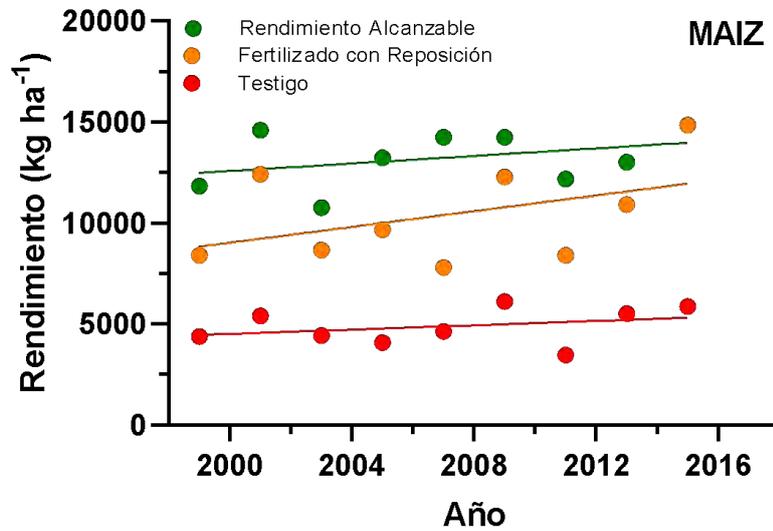


Figura 6. Evolución del rendimiento alcanzable, del tratamiento testigo y fertilizado con dosis de reposición para el cultivo de maíz, en experimentos de largo plazo (Fuente: Gudelj et al., 2017).

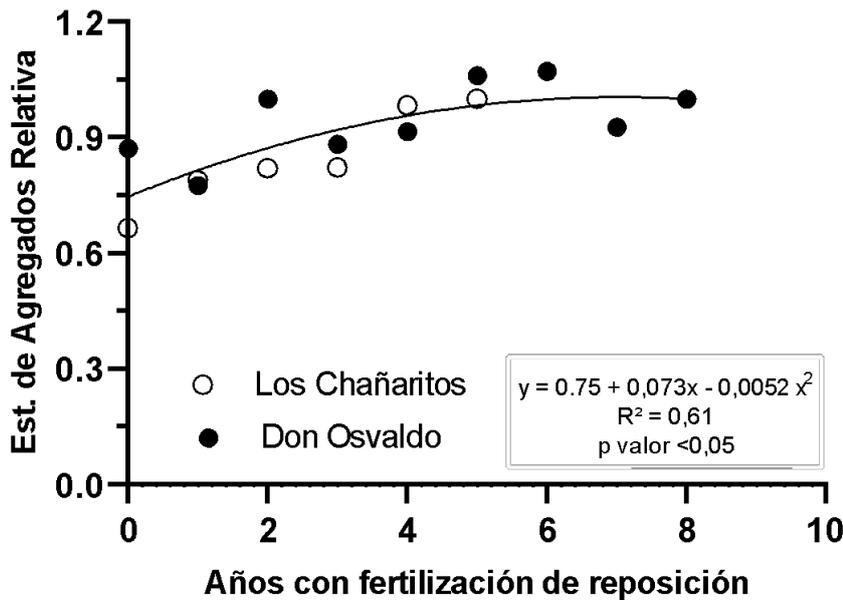


Figura 7. Relación entre la Estabilidad (Est.) de Agregados Relativa al máximo del experimento y los años de fertilización de reposición en experimentos de largo plazo (Elaborado de Gudelj et al., 2017).

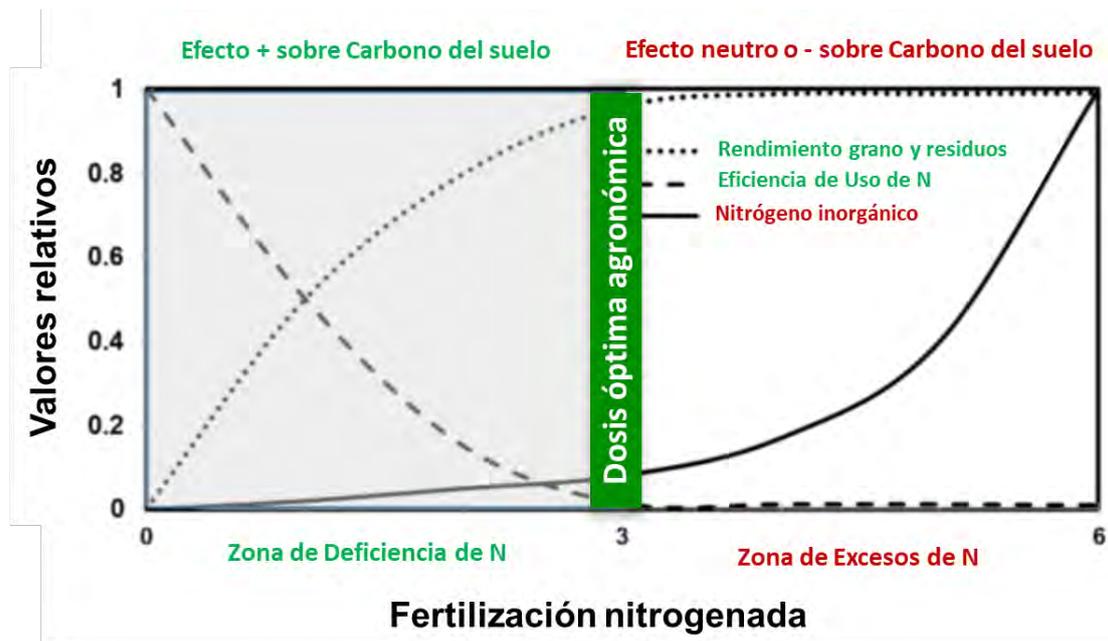


Figura 8. Relación conceptual entre la fertilización nitrogenada con el rendimiento, producción de residuos de maíz y nitrógeno inorgánico residual (Adaptado de Poffenbarger et al., 2017).

Referencias

- Casas, R. y F. Damiano. 2019. Buenas prácticas de conservación del suelo y del agua en Argentina. Pp. 53-84. En: R. Casas y F. Damiano (Eds). Manual de buenas prácticas de conservación del suelo y del agua. 1er edición. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. 520p.
- Domínguez, GF; A Andersen & GA Studdert. 2008. Cambios en la estabilidad de agregados en distintos sistemas de cultivo bajo siembra directa y labranza convencional. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Potrero de los Funes, San Luis. En CD
- Ernst, O.R., Kemanian, A.R., Mazzilli, S.R., Cadenazzi, M., Dogliotti, S., 2016. Depressed attainable wheat yields under continuous annual no-till agriculture suggest declining soil productivity. *Field Crops Res.* 186, 107-116.
- Ernst, O., Dogliotti, S., Cadenazzi, M., Kemanian, A., 2018. Shifting crop-pasture rotations to no-till annual cropping reduces soil quality and wheat yield. *Field Crop Res. Research* 218, 180-187.
- Gudelj VJ; H Ghio; O Gudelj; C Lorenzon; B Conde; J.P. Leole; C Galarza; P Vallone; P Tamburrini y F García. 2017. Evaluación de reposición de nutrientes en experimentos de larga duración del Sudeste de Córdoba. Ensayos de larga duración en Argentina: un aporte al logro de sistemas agrícolas sustentables / Hugo Krüger ... [et al.]; compilado por Fernando Salvagiotti; Hugo Krüger; Guillermo Studdert. - 1a ed. - Entre Ríos: Ediciones INTA, 2017.
- Poffenbarger HJ, Barker DW, Helmers MJ, Miguez FE, Olk DC, et al. (2017) Maximum soil organic carbon storage in Midwest U.S. cropping systems when crops are optimally nitrogen-fertilized. *PLOS ONE* 12(3): e0172293. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172293>.
- Satorre, E. y F. Andrade. 2021. Cambios productivos y tecnológicos de la agricultura extensiva argentina en los últimos quince años. *Revista de divulgación científica y tecnológica de la Asociación Civil Ciencia Hoy*, Volumen 29 número 173.
- Sainz Rozas, H., Echeverría, H.E., Angelini, H.P. 2011. Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana Argentina. *Ciencia del Suelo.* 29: 29-37.
- Studdert, GA. 2017. Ensayos de larga duración de la Unidad Integrada Balcarce: un aporte al manejo de la fracción orgánica de los suelos del Sudeste Bonaerense. p. 235-266. / Hugo Krüger ... [et al.]; compilado por Fernando Salvagiotti; Hugo Krüger; Guillermo Studdert. - 1a ed. - Entre Ríos: Ediciones INTA, 2017.
- Tittonel, P.A. y K. Giller. 2013. When yield gaps are poverty traps: The paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture. *Field Crops Research* 143:76-90.
- Tourn, SN; CC Videla & GA Studdert. 2019. Ecological agriculture intensification through crop-pasture rotations does improve aggregation of southeastern-Pampas Mollisols. *Soil Till. Res.* 195:104411. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104411>.

La estructura de cultivo y las brechas de rendimiento en el maíz

Gustavo A. Maddonni

Cátedra de Cerealicultura FAUBA-IFEVA CONICET
Avenida San Martín 4453 (C1417DSE), CABA. maddonni@agro.uba.ar

Introducción

La estructura de un cultivo se encuentra definida por el tamaño y la disposición espacial de los órganos (hojas, raíces) responsables de la captura de recursos aéreos (i.e. radiación) y edáficos (i.e. agua y nutrientes) (Satorre y Maddonni, 2018). Dicha estructura presenta una dinámica temporal determinada por los efectos del ambiente (principalmente temperatura y en menor magnitud el fotoperíodo) sobre la fenología del cultivo (ritmo de aparición de hojas y profundización de raíces) y modulada por los factores que regulan el crecimiento de los órganos (radiación, agua y nutrientes) (Maddonni y Otegui, 1996).

Las prácticas de manejo impactan sobre la dinámica y el tamaño de la estructura del cultivo y con ello sobre la captura de recursos, la producción de biomasa y la determinación del rendimiento alcanzado por el cultivo.

En ausencia de limitaciones hídricas-nutricionales, retrasos en la fecha de siembra pueden impactar positivamente sobre el tamaño de la estructura del canopeo (mayor captura diaria de recursos), pero acortar el ciclo del cultivo a floración y posicionar a este momento crítico para el rendimiento a menores valores diarios de radiación incidente (Maddonni, 2012). Es por ello, y según la latitud y el rango de fechas de siembra exploradas, cultivos de siembras más tardías pueden alcanzar menores rendimientos que los tempranos en ambientes sin limitaciones hídrico-nutricionales (i.e. menores rendimientos potenciales).

Sin embargo, en condiciones de secano los rendimientos alcanzados en siembras tardías pueden resultar similares o superiores a los de siembras tempranas debido a menores limitaciones hídricas y/o menores episodios de temperaturas extremadamente altas (i.e. golpes de calor) en floración (Maddonni, 2012; Mercau y Otegui, 2014; Maddonni et al., 2021). Por otro lado, para una determinada fecha de siembra tanto los rendimientos potenciales como los rendimientos de secano pueden variar entre años (según la variabilidad de los registros

climatológicos de la localidad), y según la expectativa de año (señales del fenómeno ENSO) y el ambiente (reserva de agua útil de los suelos previo a la siembra), los productores pueden tomar decisiones sobre la densidad de siembra, el genotipo y la necesidad de fertilización (Rotili et al., 2019; 2020).

Como resultado, y para un rango estrecho de fechas de siembra, algunos lotes de una misma región podrán alcanzar rendimientos superiores a otros, acercándose a los máximos rendimientos de secano a obtener en esa localidad (i.e. rinde potencial limitado por agua). Es así que las brechas entre los rendimientos alcanzados en secano y los potenciales limitados por agua podrían variar según la decisión de los productores en lo referente a la selección de la densidad de siembra, el genotipo (ambos componentes de la estructura del cultivo), el manejo del agua (barbechos, sistemas de labranzas) y de los nutrientes (fertilización) y las medidas de protección a la acción de componentes bióticos (malezas, plagas, enfermedades).

En esta presentación se utilizarán bases de datos de productores, salidas de modelos de simulación de cultivos, e información de redes experimentales de diferentes regiones de producción de maíz de Argentina y Uruguay con el objetivo de cuantificar brechas: i) para distintas fechas de siembra (incluyendo la interacción con el tipo de suelo en algunas regiones), ii) ante cambios en la densidad de siembra en interacción con N, P y el ambiente y iii) según la plasticidad del genotipo ante cambios en la densidad de siembra.

Resultados

Considerando la región núcleo maicera, las brechas entre rendimientos alcanzados y potenciales limitados por agua pueden variar entre fechas de siembra (temprana= 27-56%; tardía=15-26%) y tipos de suelo (mayor en Argiudoles vérticos en fecha temprana= 28-51%; y menor en Argiudoles típicos en fecha tardía=7-16%).

Para esta misma región, los maíces sembrados sobre Hapludoles típicos con acceso a napa presentarían las brechas más estables entre fechas de siembra (ca. 6-21% en ambas fechas).

En el SO de Buenos Aires, maíces de fechas tardías presentan brechas más estables entre tipos de suelos con distinta profundidad al horizonte calcáreo (ca. 35%) y entre años que en fechas tempranas (21-45% en suelos profundos y someros; respectivamente).

Por el contrario, en Uruguay maíces de secano de fechas tempranas alcanzan similares brechas que los tardíos de segunda siembra (ca. 60%), tal como se ha registrado en la región Centro de Argentina. Finalmente, para la región del Litoral de Argentina (Entre Ríos), en fechas de siembra tardías en suelos Peludert y Argiudoles vérticos, las brechas varían fuertemente según el contenido de agua del suelo a la siembra, resultando menores en maíces de segunda sobre un suelo con 60% del perfil cargado a la siembra (0-30%) y mayores sobre suelos con el 30% de agua útil (0-50%).

El ajuste de la densidad de siembra puede reducir las brechas de rendimiento en los maíces de secano, y la magnitud dependerá del ambiente. Por ejemplo, para la región Centro de Argentina, para un rango de densidades entre 4 y 7 pl/m², las brechas pueden resultar cercanas a 0% (en ambientes de bajo potencial sin respuesta a la densidad) o llegar a 30% (ambientes de mayor potencial) para un rango superior de densidades. En el Oeste arenoso (O de BsAs y E de La Pampa) para un rango de densidades entre 3.5 y 10 pl/m², las brechas se aproximan a 0% (en fechas tardías en Hapludoles thapto y típicos), están cercanas a 10-15% en Hapludoles énticos tanto de fechas tempranas como tardías y en Hapludoles típicos de fechas tempranas y pueden resultar negativas (-105%) en Hapludoles thapto de fechas tempranas al incrementar la densidad.

Analizando la interacción densidad x híbrido, para el N de Buenos Aires en fecha temprana sobre Argiudoles vérticos, los híbridos de maíz con capacidad de macollaje manifestaron brechas más variables ante el ajuste de la densidad (3-23%) que los híbridos prolíficos (ca. 3-11%) o flex (2-27%), mientras que en el Oeste Arenoso las brechas resultaron similares entre híbridos (ca 25%) pero menos variables en el híbrido macollador.

Finalmente, el manejo nutricional puede reducir brechas y la magnitud dependerá del grado de limitación del elemento en el lote. Por ejemplo, en el Oeste Arenoso las brechas

originadas por deficiencias de N pueden variar entre tipos de suelo (0-28%) resultando para un mismo suelo superiores en fecha temprana que tardía (e.g. 14% y 3% para H. típico en Villegas) y cercanas a 15% en ambientes limitados por P.

En resumen, la optimización del manejo de la estructura del cultivo es una herramienta exitosa en el cierre de brechas en maíz. Según las estimaciones de esta presentación, los rangos de brechas entre fechas de siembra parecen ser superiores que los originados por el ajuste de la densidad, el genotipo o el manejo nutricional. Sin embargo, es necesario identificar para cada ambiente la mejor combinación de la fecha de siembra, densidad y genotipo y el manejo nutricional a efectos de reducir las brechas en maíces de secano.

Agradecimientos

La información utilizada para este trabajo proviene de bases de datos y/o simulaciones correspondientes a Región CREA Centro, CREA Mari Lauquen y CREA de Agosto, CREA N de BsAs, Bayer Uruguay, Grupo GEASO, EEA INTA General Villegas, EEA INTA Paraná y RED UBA de Maíz.

Referencias

- Maddonni, G. A. 2012. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina, a probabilistic approach. *Theoretical and Applied Climatology*. 107: 325-345
- Maddonni, G. A.; Parco, M.; Rotili, D. H. 2021. Manejo de la estructura del cultivo de maíz en ambientes marginales de Argentina. *Agronomía y Ambiente*. 41:90-105.
- Mercau, J.L.; Otegui, M.E. 2014. A modeling approach to explore water management strategies for late-sown maize and double-cropped wheat-maize in the rain-fed Pampas region of Argentina. *Advances in Agricultural Systems Modeling*. 351-374.
- Rotili, D.H.; Giorno, A.; Tognetti, P.; Maddonni, G.A. 2019. Expansion of maize production in a semi-arid region of Argentina: climatic and edaphic constraints and their implications on crop management. *Agric. Water Manag.* <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105761>
- Rotili, D. H.; de Voilb, P.; Eyre, J.; Serafin, L.; Aisthorpe, D.; Maddonni, G. A.; Rodríguez, D. 2020. Untangling genotype x management interactions in multi-environment on-farm experimentation. *Field*

Crops
<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107900>.
Satorre, E.H.; Maddonni, G. A. 2018. Spatial Crop
Structure in Agricultural Systems. En: Encyclopèdia

of Sustainability Science and Technology. R. A.
Meyers (ed). Springer. 1-17.

Actualización sobre el manejo responsable de nutrientes en los sistemas agro-productivos de la Argentina

Martín Díaz-Zorita

Facultad de Agronomía UNLPam (RN 35 km 334, Santa Rosa, La Pampa, Argentina)
mdzorita@agro.unlpam.edu.ar

Los nutrientes son compuestos químicos necesarios para el metabolismo de las plantas que hacen al crecimiento y a la producción de los cultivos. Diversos estudios, locales e internacionales, confluyen en cuantificar que el resultado del manejo de los nutrientes representa una brecha, medida en términos de resultado productivo, de al menos del 30% de la producción alcanzable por los cultivos (Stewart *et al.* 2005, Díaz-Zorita y Grasso, 2016).

Reconocemos a los nutrientes como recursos claves en la producción, cuyas tecnologías de incorporación en los cultivos deben ser manejados con eficiencia y efectividad. Entre estas tecnologías es irremplazable el aporte de estos elementos contenidos en los fertilizantes por lo que la práctica de fertilización se enarbola como una herramienta tecnológica estratégica. Es así como recientemente, y acorde a demandas específicas de diferentes sistemas de producción argentinos, los resultados de relevamientos del uso de fertilizantes para la producción de cultivos extensivos en Argentina muestran una amplia adopción de la práctica de fertilización. Anualmente, entre el 81 y el 90 % de la superficie cultivada con cereales (maíz, sorgo, trigo y cebada) es fertilizada principalmente con fuentes nitrogenadas y fosfatadas mientras que algo menos del 50 % del área con soja es fertilizada mayoritariamente con fertilizantes fosfatados (Fertilizar AC, 2023). Las necesidades de N en soja son complementadas en una alta proporción del área cultivada a partir de la inoculación (Peticari y Piccinetti, 2019).

El uso de nutrientes, fertilización, es creciente y acompaña a mejoras en la producción. Sin embargo, aún ante la generalizada implementación de estas prácticas, los criterios para el diagnóstico y para su manejo son diversos y en algunos casos insuficientes para alcanzar adecuados resultados sobre los cultivos y sus aportes integrales a los sistemas agro-productivos argentinos.

Es propósito de esta presentación describir algunas de las consideraciones de base, “los cimientos”, que hacen al manejo de los nutrientes como elementos clave para plantear estrategias eficientes de administración y alcanzar efectivos aportes a los sistemas productivos argentinos.

La amplitud esperada de las contribuciones por fertilización, planteada desde los aportes en rendimientos y del cuidado del ambiente, sustenta el valor de aplicar estrategias de manejo responsable de la nutrición de cultivos. En su implementación podemos observar una continua evolución desde el reconocimiento exploratorio de su contribución general (i.e. elementos individuales con limitaciones en su disponibilidad para los cultivos) hasta la integración en modelos complejos específicos contemplando, por ejemplo, y entre otros elementos, la aplicación en dosis variables acordes a las demandas específicas del genotipo cultivado y condiciones propias del sitio de producción (Fig.1).



Figura 1: Secuencia general de la evolución de mejoras en la eficiencia de recomendaciones de fertilización (Díaz-Zorita, 2017).

En las áreas agrícolas argentinas son abundantes los estudios que describen la expansión en la frecuencia de limitaciones nutricionales para el normal crecimiento y producción de cultivos. En general, tanto con estudios de análisis de indicadores suelos (Sainz Rozas *et al.* 2019) como análisis foliares en cultivos en producción (Grasso y Díaz-Zorita, 2018) y de respuestas a la fertilización (Rouillet *et al.* 2022), se identifican restricciones en la oferta de nitrógeno, de fósforo, de azufre y de algunos micronutrientes (ej. zinc y boro) que

requieren plantear estrategias de fertilización. Aun cuando el uso de fertilizantes, por ejemplo, con fósforo, aumentó acompañando la expansión y la mayor producción agropecuaria, los niveles de indicadores de fertilidad de suelos muestran que los niveles extractables de este elemento disminuyen. En la Figura 2 se observa que el valor medio ponderado de fósforo extractable de suelos agrícolas argentinos se redujo aproximadamente a razón de 1 ppm/año entre 2011 y 2018.

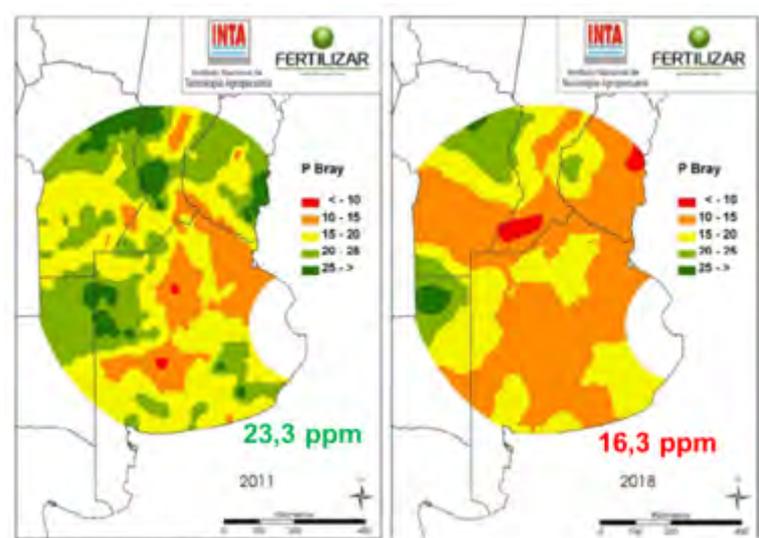


Figura 2: Niveles de fósforo extractable de suelos agrícolas argentinos evaluados en el 2011 y el 2018 (Adaptado de Sainz Rozas *et al.* 2019).

Uno de los planteos de fertilización más difundidos, en la medida que los rendimientos no sean mayormente limitados mostrando pérdidas de producción, es el de reiterar la práctica más común en la región. Esta aproximación, si bien en

promedio puede ser equilibrada en los resultados económicos de los planteos productivos, captura moderadamente otras mejoras de manejo de los cultivos (ej. incorporación de genotipos mejorados, ajustes en la estructura de los

cultivos) o la expresión de ineficiencias nutricionales combinadas. Es así como en los modelos aplicados en la agricultura moderna integran prácticas mejoradas de manejo de la fertilización y procuran establecer estrategias para el uso responsable de nutrientes tal de implementar fuente y dosis de fertilizantes en el lugar y en el momento correcto (Grasso y Díaz-Zorita, 2020). Para tal propósito convergen en combinar tres pilares de conocimiento atendiendo a caracterizar, para cada cultivo y unidad de manejo predeterminada, la demanda de nutrientes (requerimientos nutricionales), su disponibilidad (oferta) y la decisión (aplicación) operativa. Surgen así complejos y variados modelos de recomendación donde se conjugan elementos propios de los nutrientes y cultivos que atienden a diferencias provenientes del

conocimiento del sitio integrado a decisiones empresariales estratégicas.

Las actuales decisiones de aplicación de fertilizantes, mayormente sustentados en la reiteración de prácticas con limitada consideración de información complementaria, mejoran al reconocer (con datos) los continuos y consistentes cambios en las relaciones entre la disponibilidad de nutrientes, las demandas por los cultivos y las alternativas de decisión o de aplicación. En este camino, el primer paso para el manejo responsable de los nutrientes es identificar los nutrientes potencialmente limitantes para el crecimiento y producción del cultivo a realizar. Para ello es importante emplear indicadores de diagnóstico apropiados (ej. análisis de suelos) y ambientados en concordancia con las expectativas productivas.



Figura 3: Elementos a considerar para el diagnóstico de fertilidad de suelos al elaborar estrategias de manejo responsable de fertilizantes.

Luego de identificar él o los nutrientes que reducen el crecimiento de los cultivos hay que diseñar estrategias para la incorporación en los cultivos de estos elementos oportunamente y en cantidad suficiente. Los pasos siguientes requieren definir la fuente (fertilizante) a emplear y definir dónde y cuándo se aplicará el fertilizante tal de lograr la nutrición adecuada de

las plantas para evitar limitaciones en su crecimiento. La cantidad del fertilizante a aplicar conjuga la estrategia integral de fertilización (suficiencia o reposición) con las diferencias en eficiencia de provisión de los elementos atendiendo a la fuente empleada, su ubicación y momento de aplicación (Fig. 4).



Figura 4: Principios clave para la aplicación responsable de fertilizantes (Adaptado de Grasso y Díaz-Zorita, 2020).

En síntesis, en la Argentina, la disponibilidad actual de nutrientes limita el crecimiento normal de las plantas y reduce, frecuente y crecientemente, la producción (y la calidad) de los cultivos. Abundan los resultados de evaluaciones extensivas que muestran que estas restricciones pueden reducir en hasta el 30% los rendimientos y afectar negativamente la composición de los granos y forrajes cosechados.

En el manejo responsable de la nutrición hay que contemplar los aportes en oportunidad y en cantidad suficiente, entre otros elementos, de Nitrógeno, de Fósforo, de Azufre, de Zinc. Los diagnósticos ambientados ayudan a conocer cuantitativamente el estado de fertilidad y expectativas productivas de cada sitio a manejar. En este marco, integrar herramientas de ambientación y aplicar adecuadamente el muestreo y análisis de los sitios productivos es establecer responsablemente el primer paso de manejo nutricional de cultivos.

Para mejorar la eficiencia productiva, y la efectividad de la práctica, es importante cubrir “a tiempo” las necesidades de nutrición de las plantas accediendo a las diversas y modernas tecnologías de manejo para el diagnóstico e interpretación y de aplicación disponibles.

Referencias

- Díaz-Zorita M. y A. A. Grasso. 2016. Fertilización intensificada de planteos agrícolas. XXIV Congreso Anual AAPRESID, Rosario, Santa Fe (Argentina).
- Díaz-Zorita, M. 2017. Modelos integrados de recomendación de fertilización en la región pampeana. En. IPNI-Fertilizar AC, Resúmenes de conferencias y posters del Simposio Fertilidad 2017, Rosario (SF, Argentina), pp. 108-113.

Díaz-Zorita, M. 2019. ¿Hay una receta para la fertilización perfecta?. En. Fertilizar AC, Resúmenes de conferencias y posters del Simposio Fertilidad 2019, Rosario (SF, Argentina).

Fertilizar AC. 2023. Detalle de consumo de fertilizantes - Extensivos. <https://fertilizar.org.ar/estadisticas/>. (fecha de consulta: 12 de abril del 2023).

Grasso, A. A. y M. Díaz-Zorita. 2018. Valorización inicial de estrategias de fertilización en la región pampeana. Actas XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Tucumán (Argentina), Comisión 3: 173-177.

Grasso, A. A. y M. Díaz-Zorita. 2020. Manual de buenas prácticas de manejo de fertilización. Fertilizar Asociación Civil, C.A. de Buenos Aires (Argentina), 60 pp.

Perticari, A. y C. F. Piccinetti. 2019. Inoculantes Microbianos en la Agricultura Argentina y aportes de la Fijación Biológica de Nitrógeno en leguminosas cultivadas. RELAR, Puerto Varas (Chile)

Rouillet, N.; A. A. Grasso y M. Diaz-Zorita. 2022. Análisis acumulado de aplicar estrategias de fertilización de largo plazo en cultivos extensivos. XXVIII Congreso de la AACS, noviembre 2022 C.A. Buenos Aires, pp. 788-792

Sainz Rozas, H. R., Eyherabide, M., Larrea, G. E., Martínez Cuesta, N., Angelini, H. P., Reussi Calvo, N. I., y Wyngaard, N. 2019. Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana. En. Fertilizar AC, Resúmenes de conferencias y posters del Simposio Fertilidad 2019, Rosario (SF, Argentina)

Stewart, W.M, D. W. Dibb, A. E. Johnston y T. J. Smyth. 2005. The Contribution of Commercial Fertilizer Nutrients to Food Production Ag. J. 97:1-6.

Nutrición de largo plazo en secuencias agrícolas pampeanas

Rouillet, N¹; Grasso, A¹; Sacks, M²; Ventimiglia, L⁴; Ferraris, G⁴; Faggioli, V⁴; Esposito, G⁵; Quintero, C⁶; Zamora, M⁷; Diaz-Zorita, M³

¹Fertilizar Asociación Civil, ²Bunge, ³F. Agronomía UNLPam, ⁴INTA, ⁵UNRC, ⁶UNER, ⁷CHEI Barrow
Correo electrónico: nrouillet@fertilizar.org.ar

Resumen

Las variadas condiciones de manejo de cultivos, y en particular de su nutrición, conducen a resultados productivos dispersos que limitan la valorización de los aportes de la aplicación de fertilizantes. El uso de diferentes estrategias, o aproximaciones para el manejo de la nutrición, tiene efectos tanto de corto como de largo plazo sobre la producción de cultivos, independientes o en secuencias, y sobre el suelo, tanto en las propiedades químicas como físicas (v.g. mejoría en la infiltración de agua del perfil) y biológicas. La implementación de modelos de recomendación regionales o de nutrición balanceada incorporando indicadores de caracterización del sitio y diferentes expectativas productivas permitiría mejorar los rendimientos a prácticas frecuentes de fertilización. Este trabajo intenta cuantificar las diferencias en producción de planteos de nutrición contrastantes en condiciones agrícolas representativas de la región pampeana, analizar su consistencia en las distintas zonas de producción. Luego de 6 campañas de estudio, se validaron mejoras en los rendimientos de los cultivos al implementar estrategias de fertilización recomendadas o de nutrición balanceada con respecto a la aplicación actual de esta práctica. Los rangos de mejora varían según cultivos y planteos de nutrición. Gran parte de la mejora en la producción de los cultivos e indicadores de fertilidad de suelos depende de la elección de la estrategia de manejo de nutrientes en secuencias agrícolas. En la región pampeana, bajo condiciones no limitadas en nutrición los rendimientos de los cultivos superan en aproximadamente el 20% a los alcanzados con las prácticas frecuentes de fertilización. Esta respuesta a la nutrición fue independiente del ambiente productivo para los cultivos analizados.

Introducción

La provisión adecuada y suficiente de alimentos, será uno de los mayores desafíos que la humanidad deberá atravesar en las próximas décadas. La demanda mundial de alimentos viene aumentando a una tasa superior al aumento del rendimiento potencial y dado que la expansión de la frontera agrícola parece ser poco factible (y ambientalmente insostenible), el incremento del rendimiento es crucial para satisfacer en el futuro los requerimientos mundiales y locales de grano. Esta creciente demanda de alimentos, asociada a las necesidades de sostener la producción agrícola, impulsa al estudio del efecto de la fertilización sobre el rendimiento de los cultivos y sobre la eficiencia agronómica de su utilización.

En la región pampeana, la implementación de diferentes estrategias o aproximaciones para el manejo de la fertilización tiene efectos tanto de corto como de largo plazo sobre la producción de cultivos independientes o en secuencias y sobre el suelo. Se espera que la nutrición no limitante, a partir de los aportes por fertilización, explique entre el 29% y 39% de los rendimientos máximos alcanzables de soja y de trigo, respectivamente (Díaz-Zorita y Grasso, 2016). Sin embargo, a pesar de estas expectativas de brechas en los rendimientos, el área fertilizada en cultivos de cereales es menor al 80% del área cultivada mientras que en el caso de cultivos de soja es inferior al 57% (Díaz-Zorita y Grasso, 2016). Además, las dosis medias de fertilizantes aplicadas también muestran aportes de nutrientes en cantidades inferiores a las extraídas en la producción de granos. Nitrógeno y fósforo son los elementos mayormente aplicados y, en menor magnitud, el azufre, mayormente aplicado en combinación con N o con P (Grasso y Díaz-Zorita, 2018; Fertilizar AC, 2019) La aplicación de micronutrientes es de menor magnitud siendo el cinc el nutriente más utilizado. Las necesidades de N en cultivos de soja son complementadas en una alta proporción del área cultivada a partir de la inoculación (Peticari y Piccinetti, 2019).

El desafío para la fertilización es cubrir los requerimientos de nutrientes que el suelo no puede aportar para maximizar los rendimientos. Este manejo de la nutrición de los cultivos reiterado en el sistema afecta no sólo los niveles de fertilidad de los suelos, sino que acentúa en los rendimientos entre los diferentes planteos. Son abundantes los estudios de suelos que muestran la reducción en niveles extractables de diversos nutrientes en comparación con su estado original (Sainz Rozas et al., 2011).

Por lo tanto, se espera que el manejo adecuado de la nutrición integral de los cultivos tuviera un efecto directo y relevante para mejorar la producción agrícola. Si bien la información de estudios de respuestas de cultivos de cereales a la fertilización en áreas agrícolas argentinas es abundante, su análisis integral para la identificación de potenciales áreas, geográficas o temáticas, de vacancia es menos frecuente. Algunos describen los efectos acumulados en el tiempo de la aplicación de prácticas individuales validando la implementación de estrategias de manejo bajo criterios de reposición y enriquecimiento (Barraco et al. 2014; Correndo et al. 2015).

La implementación de modelos de recomendación regionales o de nutrición balanceada incorporando indicadores de caracterización del sitio productivo y diferentes expectativas productivas permitiría mejorar la producción de cultivos y la eficiencia de uso de los nutrientes aplicados con respecto a prácticas frecuentes de fertilización. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la respuesta en rendimiento en la secuencia de cultivos frente a estrategias de nutrición contrastantes, con N, P, S y micronutrientes en cultivos y condiciones agrícolas representativas de la región, analizar esas respuestas en trigo, maíz y soja, integrando la información obtenida entre los años 2016 al 2022.

Materiales y métodos

Se establecieron módulos de evaluación de larga duración en condiciones de producción representativas de sistemas agrícolas pampeanos (Tabla 1). En todos los casos el manejo de los cultivos es bajo prácticas de labranza cero con control químico de malezas y con la aplicación de prácticas de manejo frecuentes en cultivos de alta producción adaptadas regionalmente (i.e. genotipos, control de plagas y enfermedades, etc.).

Tabla 1: Localización de los sitios experimentales y caracterización media de propiedades edáficas al iniciar los estudios.

Sitio	Localidad (provincia)	Profundidad			
		0-20 cm (mg ha ⁻¹)			0 - 40 cm
		Pe	Zn	S _{SO₄}	N-NO ₃
		(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)
1	Nogoyá (Entre Ríos)	9,3	0,96	6,9	-
2	Tres Arroyos (Bs. As.)	10,7	-	-	-
3,4,5	Río Cuarto (Córdoba)	22,9	0,82	8,2	27
6	Pergamino (Bs. As.)	14	0,79	8	90
7	25 de Mayo (Bs. As.)	8,4	0,92	5,8	42
8	25 de Mayo (Bs. As.)	10,6	0,94	6,4	62
9	25 de Mayo (Bs. As.)	8,9	0,86	4,9	47
10	Marcos Juárez (Córdoba)	11	-	2,2	-
11	Ed Castex (La Pampa)	5.2	0.62	10.4	90
12	Pergamino 2 (Bs. As.)	9	1.19	7.5	30
13	Nogoyá 2 (Entre Ríos)	8.4	0.92	16	23

En cada sitio, los cultivos y secuencias evaluados fueron seleccionados por los productores y fueron representativos de

decisiones frecuentes en las regiones en estudio. En la **Tabla 2** se presenta la secuencia de cultivos

de cada sitio y el cultivo antecesor al comienzo del ensayo.

Tabla 2: Cultivos en la rotación 2016/17, 2021-23 y el cultivo antecesor al comienzo del ensayo.

Sitio	2016/1	2017/18	2018/1	2019/20	2020/21	2021/22
Nogoyá 1 ER	Soja	Trigo/Soj	-	-	-	-
T. Arroyos BA	Soja	Soja	Cebad	Soja	Cebada	-
Rio IV 1-2-3	Maíz	Soja	Soja	Maíz	Maní	Tr/Soja
Pergamino 1	Maíz	Soja	-	-	-	-
25 de Mayo 1	Cb/Maí	Soja	Trigo	Maíz	Soja	Tr/Soja
25 de Mayo 2	Maíz	Cebada	Maíz	Girasol	Trigo/Soj	Girasol
25 de Mayo 3	Tr/Soja	Maíz	-	Tr/Soja	Maíz	Soja
M. Juárez Cba	Soja 2	Maíz	Soja	Maíz	Soja	Maíz
Miramar BA	-	Maíz	Soja	-	-	-
Edo. Castex LP	-	Soja	Maíz	Soja	Tr/Soja	Tr/Soja
Nogoyá 2 ER	-	-	Maíz	Colza/Soj	Tr/Soja	Arveja/Ma
Pergamino 2	-	-	Soja	Tr/Soja	-	-

En cada sitio se establecieron cuatro tratamientos de manejo de la nutrición de los cultivos: i) sin fertilización, ii) fertilización promedio aplicada en la región, iii) fertilización promedio recomendada y iv) fertilización balanceada. La dosis promedio de uso en cada región se estimó a partir de la información de encuestas a 1200 productores y técnicos en la región pampeana coordinada por Fertilizar AC durante la campaña 2015/2016 (Fertilizar AC, 2017). El tratamiento de fertilización recomendada promedio se estableció para cada sitio considerando resultados de análisis de suelos y expectativas de productividad media regional según información local provista por referentes locales responsables de la conducción de los estudios. La fertilización para la nutrición balanceada de altos rendimientos se estimó según los mayores rendimientos alcanzables en cada región y considerando las demandas de NPS y Zn para tal propósito (**Tabla 3**). En todos los casos, las semillas sembradas de soja fueron inoculadas en el momento de la siembra con productos comerciales para evitar limitaciones nitrogenadas en su normal crecimiento y producción. Pevio a la siembra se obtuvieron muestras de suelo de 0 a 20 cm. De cada parcela, se extrajo una muestra compuesta, y sobre ella se determinó el pH y los contenidos de materia orgánica (MO), P extractable (Bray I), N total, N-nitrato y S-sulfato.

En cada sitio, los tratamientos se dispusieron en franjas de al menos 20 m de ancho y 100 m de longitud empleando equipos convencionales de siembra y conducción de los cultivos con cosecha mecánica en estadios de madurez comercial de los cultivos. Los resultados se analizaron considerando cada sitio como una repetición y comparación entre los promedios de los rendimientos, respuestas relativas sobre el tratamiento de fertilización frecuente y la eficiencia de uso del N aplicado en cereales y del P según parámetros estadísticos descriptivos. Se emplearon pruebas de diferencias de medias significativas de T en comparaciones apareadas entre los tratamientos.

Tabla 3: Rangos de nutrientes aplicados según cuatro estrategias para la fertilización de cultivos en la región pampeana en 14 sitios de experimentación. En el caso de fertilización con N se muestran los rangos aplicados en cultivos de cereales.

Tratamiento	Nutriente (kg ha ⁻¹)			
	N	P	S	Zn
Control sin fertilizar	0	0	0	0
Fertilización promedio aplicada regionalmente	38 a 60	7 a 14	0	0
Fertilización recomendada promedio	65 a 70	12 a 18	8 a 18	0
Fertilización para nutrición balanceada de alta producción	150 a 170	27 a 34	15 a 25	1,5

Resultados y discusión

Los aportes de cada estrategia de nutrición integrando las diversas secuencias de cultivos estudiadas se analizaron en términos de los aportes relativos a la máxima producción de cada

cultivo y sitio experimental (**Fig.1**). Los rendimientos relativos se calcularon como el cociente entre el rendimiento medio de cada tratamiento, con el máximo rendimiento registrado, para cada cultivo por sitio y por campaña. La aplicación de fertilizantes, en comparación con los tratamientos control sin fertilización, contribuyó al rendimiento en un 25% en promedio para toda la secuencia de cultivos con máximos de 39% para trigo y 27% en maíz. Para la secuencia de cultivos, la mejora en la nutrición incorporando estrategias de recomendación media y alta producción, mejoró la productividad de los sistemas hasta en un 15% respecto del manejo actual. El manejo actual más frecuente de fertilizante mostró resultados en producción próximos a los observados al aplicar recomendaciones medias, con una brecha de mejora de 10% para alcanzar el máximo rendimiento.

En la escala temporal, los rendimientos promedio, acumulados a lo largo de 6 campañas arrojaron una diferencia de 16%, 23% y 37% para los tratamientos actual, recomendación frecuente y alto rendimiento respectivamente, frente al control. La aplicación sostenida de fertilizantes permitió lograr mejoras en los rendimientos (**Fig 2**).

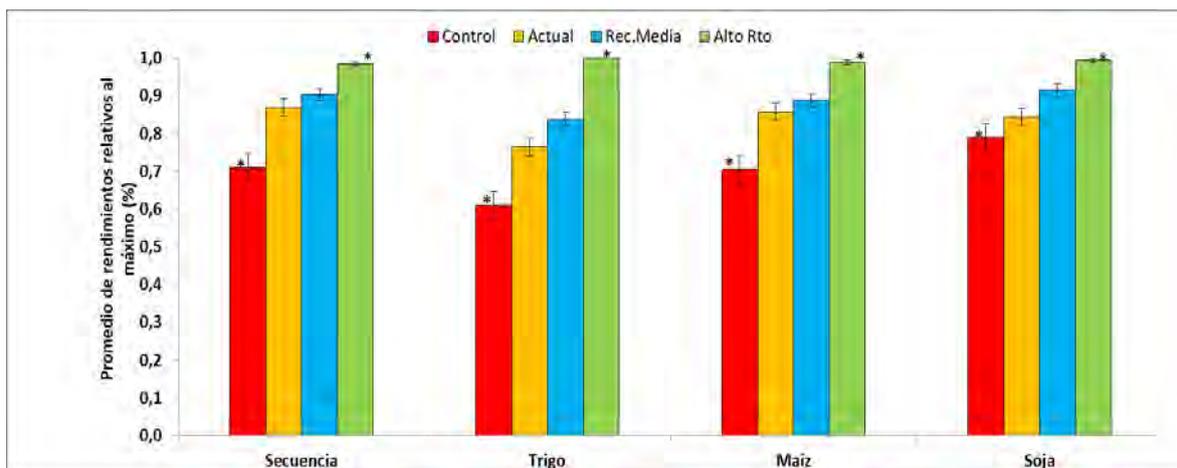


Figura 1. Efecto acumulado de rendimientos relativos de secuencias de cultivos en 6 campañas consecutivas en la región pampeana. Las barras verticales en cada columna indican el error estándar de la media. Los asteriscos (*) sobre las columnas muestran diferencias significativas con respecto a la estrategia actual de manejo de nutrientes (DMS, prueba de T $p < 0,05$).

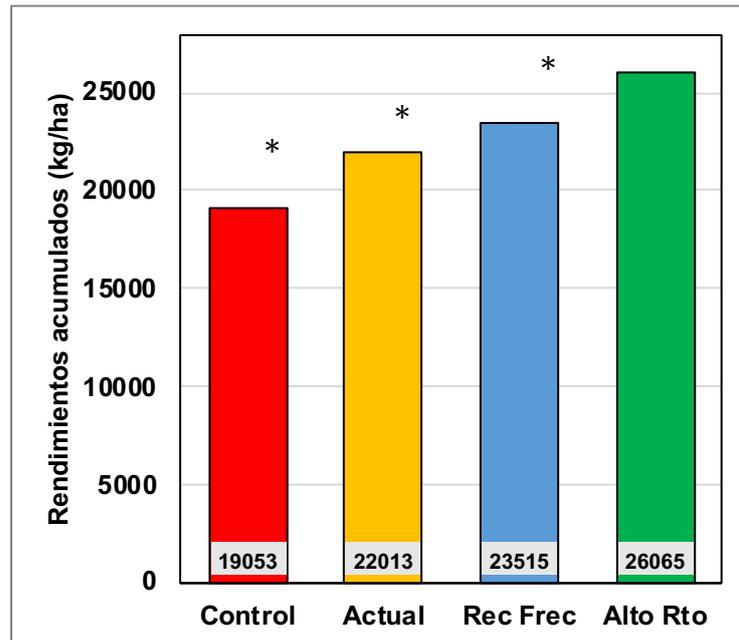


Figura 2. Rendimiento acumulado de tratamientos de nutrición contrastantes en la de secuencia de cultivos luego de 6 campañas consecutivas en la región pampeana. Los asteriscos (*) sobre las columnas muestran diferencias significativas con respecto a la estrategia actual de manejo de nutrientes (DMS, prueba de T $p < 0,05$).

En todos los cultivos la implementación de las estrategias de fertilización mostró en promedio diferentes resultados en la producción de granos. Los rendimientos de trigo sin fertilización alcanzaron en promedio los 3063 kg ha⁻¹, la mejora en los rendimientos por el manejo de la nutrición con planteos de alta producción alcanzó 5025 kg ha⁻¹ (64% de respuesta). El maíz tuvo mejoras cercanas al del 35% con rendimientos entre 6638 y 8999 kg ha⁻¹. En soja, la producción fue en promedio 2949 frente 3721 kg ha⁻¹ y las mejoras fueron de un 26%.

En un análisis espacial encontramos diferencias positivas, contrastando los distintos tratamientos de nutrición a lo largo de la región de estudio. Esto se visualiza en la Fig. 3 donde se compara para trigo maíz y soja, los rendimientos de los distintos tratamientos en distintos ambientes, expresado como promedio del sitio. La mejoría en rendimiento resulta consistente para todos los ambientes productivos y cultivos, al mantenerse las líneas de los tratamientos contrastantes de nutrición por sobre las correspondientes al tratamiento testigo. Esto resulta importante como estrategia para mitigar los efectos de la variabilidad climática sobre el

rendimiento de los cultivos. Particularmente en los cultivos de trigo y maíz, esta respuesta se ve incrementada en los sitios de mayor potencial donde los tratamientos de máxima se apartan no solo de los controles, sino también del manejo actual.

Tabla 4: Rendimientos promedios en kg ha⁻¹ para todos los cultivos según el manejo de la nutrición.

	Trigo	Soja	Maíz
Control sin fertilizar	3.063	2.949	6.638
Fertilización promedio aplicada regionalmente	3.822	3177	7.712
Fertilización recomendada promedio	4.237	3.439	8.021
Fertilización para nutrición balanceada de alta producción	5.025	3.721	8.999

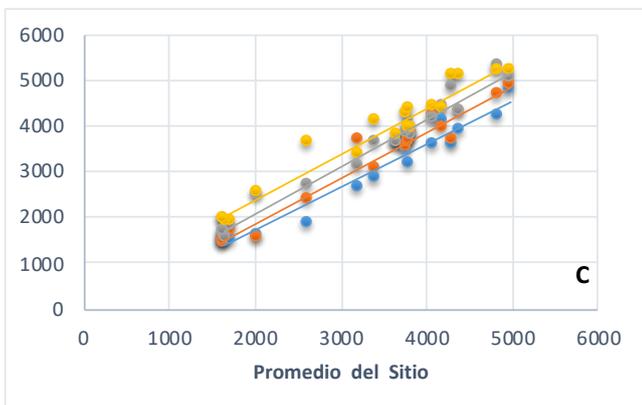
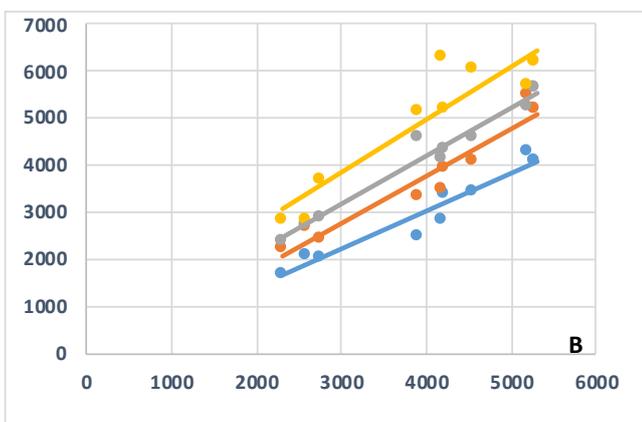
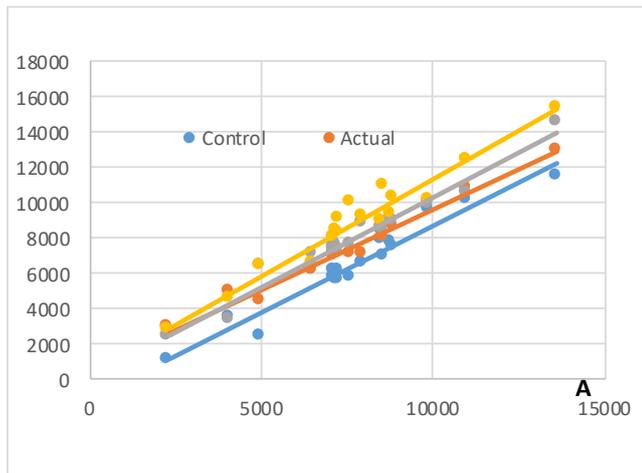


Figura 3. Rendimiento de tratamientos de nutrición contrastantes vs promedio del sitio para los cultivos de: A) Maíz, B) Trigo y A) Soja a lo largo de 15 sitios en 6 campañas consecutivas en la región pampeana.

Conclusiones

En condiciones de producción representativas de la región pampeana se validaron mejoras en los rendimientos de los cultivos al implementar estrategias de fertilización recomendadas o de nutrición balanceada con respecto a la aplicación

actual de esta práctica. Los rangos de mejora varían según cultivos y planteos de nutrición.

En condiciones no limitadas en nutrición, los rendimientos de los cultivos son de hasta casi 15% superiores a los que se alcanzan con las prácticas actuales de fertilización. En los cultivos analizados y condiciones de producción, la implementación de recomendaciones medias de fertilización (fertilización con ajustes con NPS y Zn acordes a resultados de análisis de suelos y a expectativas frecuentes de rendimientos), reducen la diferencia de producción asociada al manejo de la nutrición. La mayor brecha encontrada en este set de datos se halló en trigo, seguido por maíz.

La respuesta a la nutrición resulta independiente del ambiente productivo. La tendencia indica que esta diferencia se acentúa al incrementar el techo productivo.

Agradecimientos

A Fertilizar AC y su comité técnico por el financiamiento de los estudios y los aportes en su diseño y en la discusión de los resultados.

Bibliografía

- Barraco, M., M. Díaz-Zorita, C. Justo & A. Lardone. 2014. ¿Fertilización fosfatada por suficiencia o mantenimiento en secuencias agrícolas de la pampa arenosa? En: Actas del XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACs (ed.), Bahía Blanca, Bs. As., 5-9 mayo. 2014. AACs. Argentina.
- Correndo A.A., M. Boxler & F.O. García, 2015. Análisis económico del manejo de la fertilización con enfoque en el largo plazo. *Cienc. Suelo (Argentina)* 33:197-212.
- Díaz-Zorita M. & A. Grasso. 2016. Fertilización intensificada de planteos agrícolas. XXIV Congreso Anual AAPRESID. Del 3 a 5 Agosto de 2016, Rosario, Santa Fe.
- Fertilizar AC. 2019. Detalle de consumo de fertilizantes - Extensivos. http://www.fertilizar.org.ar/?page_id=468. (fecha de consulta: 14 de marzo del 2018).
- García F.O. e I. Ciampitti. 2010. Enfoques alternativos para el diagnóstico de fertilidad de suelos: El enfoque "tradicional". Actas CD XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACs. Rosario (Santa Fe, Argentina), en CD.
- Grasso, A. y M. Díaz-Zorita. 2018. Valorización de estrategias de fertilización en la región pampeana. XXVI Congreso Anual AAPRESID. Del 8 al 10 de Agosto de 2018, Ciudad de Córdoba, Córdoba.
- Perticari, A. y C. F. Piccinetti. 2019. Inoculantes Microbianos en la Agricultura Argentina y aportes de la Fijación Biológica de Nitrógeno en leguminosas cultivadas. RELAR, Pto.Varas (Chile)
- Sainz Rozas H., H. Echeverría y H. Angelini. 2011. Fósforo extractable en suelos agrícolas de las regiones Pampeana y extrapampeana de Argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 4:14-18.

Estrategias de fertilización de mediano plazo en sistemas de cultivos extensivos con influencia de napa

Diego Hernán Rotili^{1,2*}, Santiago Alvarez Prado^{2,3,4}, Agustín Barattini⁵, Ignacio Lamattina⁵, Matías Saks⁶, Marcos Gregorini⁷, José Francisco Andrade^{1,2}

¹ Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Departamento de Producción Vegetal, Cátedra de Cerealicultura, Buenos Aires, Argentina.

² IFEVA, Universidad de Buenos Aires, CONICET, Facultad de Agronomía, Buenos Aires, Argentina.

³ IICAR - CONICET, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario, Campo Experimental Villarino S/N, S2125ZAA, Zavalla, Santa Fe, Argentina.

⁴ Cátedra de Sistemas de Cultivos Extensivos-GIMUCE, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario, Campo Experimental Villarino S/N, S21125ZAA, Zavalla, Prov. de Santa Fe, Argentina.

⁵Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola (AACREA), Región Oeste, C1041AAZ Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

⁶ Bunge Argentina S.A., Argentina.

⁷Nutrien Ag Solutions Inc., Argentina.

*autor correspondiente: rotili@agro.uba.ar

Resumen

Las limitaciones nutricionales para la producción de cultivos de grano son ubicuas. A pesar de que el rendimiento y la respuesta económica a la fertilización se han evaluado exhaustivamente en varios cultivos en diferentes ambientes, la atención se ha centrado principalmente en el nivel del cultivo individual en lugar de en el sistema de cultivo. Es necesario evaluar los beneficios de una fertilización más intensiva más allá de una única campaña para contribuir a revertir el actual proceso de extracción de nutrientes del suelo en la Pampa argentina. La transformación de la Pampa Interior desde sistemas de producción predominantemente ganaderos a sistemas agrícolas dominados por cultivos de soja (*Glycine max* (L.) Merr.), maíz (*Zea mays* L.) y trigo (*Triticum aestivum* L.) ha llevado a una reducción del consumo de agua y al aumento del nivel freático, con una influencia positiva sobre el rendimiento de los cultivos, pero también ha socavado la materia orgánica del suelo (MOrg) y la capacidad de ciclado de nutrientes. Este estudio, realizado en ambientes de la Cuenca "A" del Salado de la Pampa Interior de Argentina, incluyó siete experimentos en los que se manejó una rotación de soja - trigo/soja 2ª - maíz bajo diferentes estrategias de fertilización (con niveles crecientes de N, P y S), incluyendo un testigo no fertilizado, a lo largo de seis campañas. Además, se sembró un cultivo adicional de soja en

el séptimo año para determinar el efecto residual de los tratamientos de fertilización impuestos previamente. La respuesta del rendimiento a la fertilización se incrementó con tratamientos de fertilización más intensivos y fue mayor para el trigo (hasta el 150 %) y el maíz (hasta el 100 %), que para la soja (hasta el 40 %) y la soja de segunda (hasta el 30 %). La respuesta general del rendimiento de los cultivos al aumento de los aportes de N y P se correlacionó negativamente con el P extractable inicial en el suelo, mientras que la respuesta al S fue mayor en sitios con un alto porcentaje de arena y baja MOrg. El beneficio económico aumentó a medida que se intensificó la fertilización, aunque las diferencias entre tratamientos no siempre fueron significativas dentro de los sitios. En promedio, la intensificación resultó en una ganancia adicional de \$187 ha⁻¹ en comparación con la estrategia típica de fertilización seguida por los productores regionales, sin considerar la respuesta residual positiva de rendimiento (10-13%) detectada en el cultivo de soja sucesivo al séptimo año. Este estudio proporcionó elementos para mejorar la comprensión de las interacciones complejas que determinan la respuesta del rendimiento de los cultivos a la fertilización, contribuyendo a optimizar las decisiones de manejo a largo plazo que afectan los sistemas de cultivo con un gran impacto a nivel regional y nacional.

1. Introducción

Las limitaciones nutricionales para la producción de cultivos de granos son ubicuas, particularmente en los países en desarrollo con extensas áreas agrícolas (Mueller et al., 2012). Por lo tanto, existe una necesidad urgente de mejorar las estrategias de fertilización para atender las necesidades de una población en crecimiento con demandas crecientes de alimentos y energía (Cakmak et al., 2002). Si bien el rendimiento y la respuesta económica a la fertilización se han evaluado exhaustivamente en muchos cultivos en diferentes ambientes, la atención se ha centrado principalmente en el nivel del cultivo individual más que en el sistema de producción de cultivos (Rodríguez y Sadras, 2011; Spiertz, 2010). El problema es que, a lo largo del tiempo, optimizar el retorno económico de cultivos individuales puede resultar en el agotamiento de nutrientes del suelo con pérdidas de fertilidad a mediano y largo plazo (Manna et al., 2007; Singh et al., 2016; Sucunza et al., 2018). En este sentido, recientemente se han informado marcados balances negativos de nutrientes en Argentina (Koritschoner et al., 2023). Sin embargo, los efectos acumulativos de la fertilización a través de las secuencias de cultivos siguen siendo un tema muy poco estudiado. Explorar los beneficios de una fertilización más intensiva más allá de una sola campaña podría ser útil para reelaborar estrategias y revertir el actual proceso de extracción de nutrientes del suelo en la Pampa argentina.

La Pampa argentina es uno de los principales graneros del mundo, dentro del cual la Pampas Interior contribuye en gran medida a su producción total (Calviño y Monzón, 2009). La Pampa Interior (Occidental y Plana) presenta suelos de textura franco-arenosa, predominantemente Hapludoles y Haplustoles de baja fertilidad (INTA, 1989; Soriano et al., 1991; Oyarzabal et al., 2018). La adopción y expansión de los sistemas de labranza cero y la mayor rentabilidad de los negocios basados en cultivos de grano frente a aquellos basados en la producción ganadera permitieron que esta región pasara de la ganadería pastoril a sistemas de producción agrícola dominados por cultivos de soja (*Glycine max* (L.) Merr.), maíz (*Zea mays* L.) y trigo (*Triticum aestivum* L.) (Díaz Zorita et al., 2002; Paruelo et al., 2005; Manuel-Navarrete et al., 2009; Andrade y Satorre, 2015). Dicha transformación redujo el consumo de agua del sistema y elevó el nivel freático, con una

influencia positiva sobre el rendimiento de los cultivos durante la última década (Nosetto et al., 2012; Alsina et al., 2020; Whitworth-Hulse et al., 2023). Al igual que otras regiones agrícolas del mundo, la combinación de texturas arenosas, décadas de agricultura y rendimientos crecientes con altas exportaciones de nutrientes ha socavado la materia orgánica (MORg), la capacidad de intercambio catiónica y la capacidad de ciclado de nutrientes del suelo (Wyngaard et al., 2022); Larrea et al., 2023). Este proceso se ha asociado con una mayor respuesta a la fertilización con N, P y S por parte de los cultivos en la Pampa Interior (Carciochi et al., 2020; Ciampitti et al., 2011; Correndo, 2018; Torres Duggan et al., 2012). Por el contrario, el K suele ser no limitante debido a la mineralogía del material parental (Zubillaga y Conti, 1996).

La MORg promueve la mineralización de N y S durante el ciclo de un cultivo (Scherer, 2001; Eriksen, 2009; Ros, 2012). De hecho, se ha encontrado que el N incubado anaeróbicamente (Nan), un predictor de la mineralización potencial de N y S, se correlaciona positivamente con el contenido de MORg en suelos templados (Schomberg et al., 2009; Wyngaard y Cabrera, 2015). Por lo tanto, a pesar de que las tasas de recuperación de N y S son típicamente altas, una mayor fertilización en suelos con niveles altos de MORg y Nan no necesariamente resultaría en mayores rendimientos dentro de una rotación de cultivos. Por el contrario, los valores de P en los suelos no están necesariamente relacionados con el contenido de MORg. Si bien la respuesta de los cultivos a la fertilización con P depende del P inicial disponible para los cultivos (Sucunza et al., 2018), la adición continua de P a través de la fertilización tiende a aumentar el P extractable en el suelo con el tiempo, principalmente debido a la baja recuperación de P por los cultivos y las bajas pérdidas de P (Ciampitti et al., 2011). Dada la naturaleza compleja de los procesos mencionados, se esperarían efectos diferenciales de una nutrición balanceada con altos aportes de P, N y S en unos pocos ciclos de rotación de cultivos en suelos con diferente textura, P-Bray, contenido de MORg o niveles de Nan, incluso dentro de la misma región agroclimática.

Experimentos a mediano y largo plazo en diferentes áreas del mundo han revelado efectos positivos de estrategias de fertilización balanceadas dentro de una rotación de cultivos considerando N, P y S (Ciampitti et al., 2011; Melchiori et al., 2014; Singh et al., 2016; Sucunza et al., 2018; Manenti et al., 2023). Sin embargo,

rara vez se ha considerado el beneficio económico (Cuvardic et al., 2004; Huang et al., 2010; Zhang et al., 2009; Manna et al., 2007; Zhao et al., 2006) y la mayoría de los experimentos se han realizado en un solo sitio, típicamente en estaciones experimentales de investigación agrícola y con muy pocas excepciones en campos de productores (Lamers et al., 2015; Correndo et al., 2015). Existe poca información sobre el efecto de las estrategias de fertilización a mediano plazo sobre el desempeño agronómico y económico de las rotaciones típicas de cultivos de grano, y ninguna ha cubierto múltiples sitios dentro de regiones con suelos arenosos e influencia de la napa freática. En este trabajo se evaluaron y contrastaron cuatro estrategias de fertilización con niveles variables de N, P y S en combinaciones no factoriales de estos nutrientes contra un control no fertilizado a lo largo de dos ciclos de una rotación soja - trigo/soja - maíz (6 años). El mismo experimento se repitió en siete sitios con suelos arenosos bajo la influencia positiva de la napa freática. Los objetivos del trabajo fueron: i) evaluar el efecto de diferentes estrategias de fertilización sobre los rendimientos de cada cultivo a través de los ciclos de rotación y los sitios (y sus interacciones); ii) determinar la relación entre la respuesta del rendimiento del cultivo a la fertilización y las variables físicas y químicas del suelo medidas al inicio de cada experimento; iii) evaluar el beneficio económico de cada estrategia de fertilización; y iv) determinar el efecto residual en un cultivo de soja sembrado luego de cumplidos los dos ciclos de rotación siguiendo diferentes estrategias de fertilización.

2. Materiales y métodos

2.1. Sitios experimentales y condiciones ambientales

Se realizaron siete experimentos entre 2014 y 2020 en la Cuenca "A" del Salado, la sección noroeste de la Cuenca del Salado en la Pampa Interior (Fig. 1). La superficie actualmente destinada a cultivos dentro de la Cuenca "A" del Salado se estima en 3,8 millones de ha y entre el 50% y el 90% se encuentra bajo la influencia de la napa freática, con variaciones interanuales (García et al., 2019). Los experimentos se establecieron en campos de productores pertenecientes a la organización sin fines de lucro CREA Oeste (Consortios Regionales de Experimentación Agrícola Zona Oeste; <http://www.crea.org>). CREA Oeste lleva a cabo un

programa experimental agrícola para generar información y adoptar nuevas prácticas basadas en evidencia científica a partir de experimentos a campo (Lacoste et al., 2022). Expertos científicos y empresas comercializadoras de insumos agrícolas (semillas, fertilizantes, etc.) trabajan junto a los productores y asesores de CREA Oeste para ayudarlos en el diseño, ejecución y análisis experimental.

La región es subhúmeda con precipitaciones predominantemente concentradas en otoño y finales de primavera. La precipitación media anual aumenta de oeste a este y la temperatura es mayor en el norte, especialmente debido a temperaturas nocturnas invernales más elevadas. Se obtuvieron registros diarios de fotoperíodo, radiación solar global, temperatura mínima, máxima y media, humedad relativa y evapotranspiración potencial del Centro de Investigación Langley (LaRC) de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) Financiado por el Proyecto "Prediction of Worldwide Energy Resource" (POWER) a través del Programa de Ciencias Aplicadas/Ciencias de la Tierra de la NASA (NASA Power). Las medias mensuales de las variables meteorológicas mensuales durante los seis años fueron muy similares entre los sitios, excepto en General Pinto, donde las temperaturas fueron ligeramente más elevadas. Además, ocurrieron eventos de temperatura mínima extrema (helada) durante el final del verano de la campaña 2018-2019 en Casbas y Carlos Casares, lo que provocó daños por heladas en los cultivos de soja de 2a. Los valores diarios de precipitación se obtuvieron de pluviómetros instalados a menos de 10 km de cada sitio experimental. Durante los años que duraron los experimentos, la precipitación anual promedio entre todos los sitios fue de 888 mm (sd = 162 mm), un 8 % menos que el promedio de 30 años (1990-2020). Casbas (774 mm, sd = 129 mm) y General Pinto (925 mm, sd = 132 mm) fueron los sitios más secos y húmedos, respectivamente. En todos los sitios, las lluvias se concentraron predominantemente al final de la primavera y el otoño, excepto en la campaña 2017/2018, cuando la primavera, el verano y el otoño fueron anormalmente secos.

Todos los lotes donde se establecieron los experimentos habían sido manejados con agricultura continua en siembra directa durante al menos quince años. Se tomaron y analizaron muestras de suelo al inicio de cada experimento (Tabla 1). Aunque todos los suelos eran

Hapludoles o Haplustoles con alto contenido de arena, los sitios diferían en características físicas (textura), biológicas (MOrg) y químicas (pH, porcentaje de sodio intercambiable - PSI -, concentración de nutrientes). En cada sitio, se monitoreó la profundidad del nivel freático cada vez que se plantó un cultivo con un freatómetro

ubicado cerca del borde del lote. En todos los sitios, la profundidad del nivel freático siempre estuvo dentro del rango de valores donde se minimiza el estrés hídrico y se maximiza el potencial de rendimiento limitado por agua para soja, trigo y maíz (Nosetto et al., 2009) (Tabla 1).

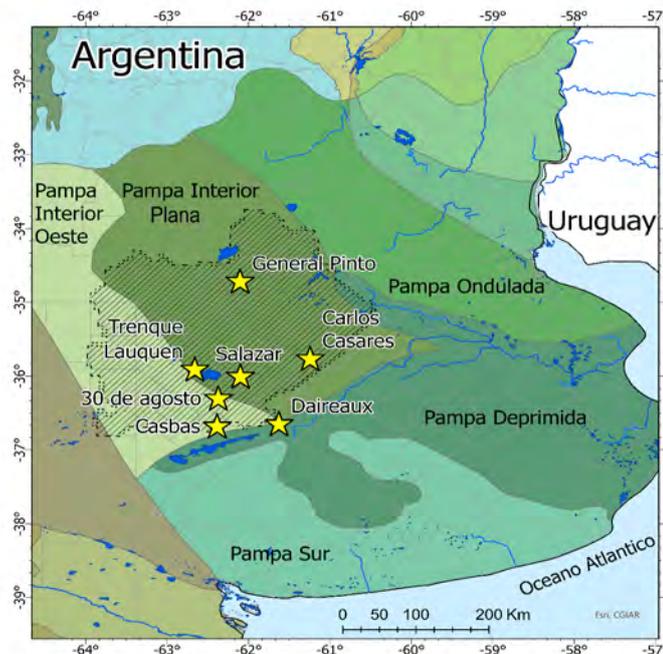


Figura 1. Ubicación de los siete experimentos de seis años de duración (2014/2015 - 2019/2020) (indicados con estrellas amarillas) dentro de la Cuenca "A" del Salado (área sombreada con rayas negras) de la Pampa Interior argentina (Oyarzabal et al., 2018).

Tabla 1. Ubicación de cada sitio experimental y valores de las variables del suelo al inicio del primer año experimental para siete experimentos de seis años de duración (2014/2015 - 2019/2020) en la Cuenca "A" del Salado de la Pampa Interior argentina. Todos los valores de las variables del suelo corresponden a una profundidad de 0-20 cm excepto N-NO₃⁻ (0-60 cm).

Sitio		Daireaux	Casbas	Salazar	30 de Agosto	Carlos Casares	Trenque Lauquen	General Pinto
Arena	%	80.9	78.6	63.1	70.2	68.1	69.2	64.7
Limo	%	8.9	13.2	22	17.4	21.2	18.1	22.9
Arcilla	%	10.2	8.2	14.8	12.4	10.6	12.7	12.4
Antecesor		Soja	Trigo/Soja 2 ^a	Maíz	Soja	Maíz	Soja	Soja
Variación napa freática*	m	(0.7-1.7)	(0.6-2.2)	(1.0-2.4)	(1.2-2.4)	(1.3-1.5)	(1.0-2.0)	(0.8-1.6)
MOrg	%	1.9	1.9	2.9	3.2	3.1	2.4	2.7
pH		5.9	5.9	6	6.1	5.7	6	5.7
Nan	ppm	21.6	22.7	52.1	39.8	34.4	27.3	36.5
N-NO ₃ ⁻	ppm	16.8	15.8	24.8	40.3	20.1	20.1	22.8
P-Bray	ppm	7.6	7.9	7.8	7.6	4.5	6.3	11.38
S-SO ₄ ⁻	ppm	5.1	4.9	5.6	4.4	4.7	4.5	5.1
PSI	%	0.5	0.63	0.47	0.44	0.49	1.04	0.71

*Rango de valores de la profundidad de la napa freática a la siembra de cada cultivo a lo largo de los seis años de duración del experimento.

2.2. Diseño experimental y tratamientos

Se estableció una rotación de cultivos típica a nivel regional consistente en soja-trigo/soja 2a-maíz durante dos ciclos (3 años por ciclo), desde la campaña 2014/2015 hasta la 2019/2020. Todos los experimentos se realizaron utilizando la tecnología aplicada por los productores en términos de maquinaria (sembradoras, pulverizadoras y cosechadoras), protección de cultivos (dosis de agroquímicos y fechas de aplicación) y manejo de cultivos aparte de la fertilización (fecha de siembra, genotipo y densidad). Las semillas de soja se inocularon con *Bradyrhizobium japonicum*. La distancia entre surcos varió ligeramente dependiendo de la sembradora disponible en cada sitio. La soja 2a se sembró inmediatamente después de la cosecha de trigo. En cada sitio se realizó un experimento de diseño de bloques completos con tres repeticiones (bloques). Los tratamientos se asignaron al azar dentro de los bloques. Cada experimento abarcó 4 ha, conformadas por 12 parcelas de 3080 m² cada una para los tratamientos (14 m de ancho y 220 m de largo), más una franja extra de 3080 m² para la franja sin fertilizar (ver abajo). Finalmente, en cinco sitios, se sembró un cultivo adicional de soja en el año siete (campaña 2020-2021) para determinar la influencia residual sobre este cultivo de los tratamientos de fertilización impuestos previamente (Tabla S4).

Los tratamientos consistieron en estrategias de fertilización a mediano plazo que diferían en la selección de nutrientes y dosis para cada cultivo (Tabla 2). Los tratamientos se eligieron en base a posibles planteos generales de fertilización por parte de los productores, luego de varios talleres de discusión en los que participaron científicos, productores de CREA Oeste y asesores. Brevemente, (i) "Típico (NP)" era el esquema de fertilización regional típico en el momento en que se establecieron los experimentos con dosis regulares de N y P en trigo y maíz y sin fertilización de cultivos de soja (en adelante, TYP); (ii) "Suficiencia (N+P+)" siguió los modelos utilizados en el percentil 20 superior de los lotes de productores regionales en términos de rendimiento de cada cultivo, cuyo manejo surge principalmente a partir de la experimentación local previa de los productores de CREA Oeste (se pueden encontrar varios informes técnicos en español en www.creaoeste.org.ar) e incluyó dosis más altas de N y P para trigo y maíz sumadas a una

fertilización con P de soja (en adelante SUFF); (iii) "Suficiencia+S (N+P+S)" incluía las mismas dosis de N y P que SUFF, pero también incluía la fertilización con S en trigo, maíz y soja (en adelante SUFF+S); (iv) "Intensificado (N+P+S)" consideró un programa de fertilización balanceado y de dosis intensiva con dosis de N aún más altas para asegurar la maximización de los rendimientos de trigo y maíz, con una alta disponibilidad de S, más dosis de P más altas para el trigo y el maíz después un criterio general de reposición y reconstrucción de P. Cabe señalar que la reposición de P y la reconstrucción no se siguieron estrictamente mediante la estimación de los rendimientos de cada cultivo y la extracción de nutrientes, sino que la dosis se estimó como la extracción de cultivos que alcanzaron los rendimientos máximos (el 20 por ciento superior) de los lotes de los productores y se corroboró con la información local a partir de experimentos de CREA Oeste y concentraciones típicas de nutrientes en base a Tablas IPNI (IPNI, 2013). Este tratamiento (en adelante denominado INT) también incluía la fertilización con P de los cultivos de soja y la fertilización con S a las mismas dosis que el tratamiento SUFF+S. Por lo tanto, el principal nutriente incrementado en todos los cultivos al pasar de TYP a SUFF fue P (también N en trigo y maíz), de SUFF a SUFF+S fue S, y de SUFF+S a INT fue P (también N en trigo y maíz). La soja 2a no se fertilizó a la siembra, siguiendo prácticas típicas de la región en las que el suelo se fertiliza con S y/o P a la siembra del cultivo de trigo en una secuencia trigo/soja 2a (Correndo et al., 2015). Además, se incluyó una franja sin replicar sin fertilizar (en adelante denominada ZERO) al lado de cada experimento como referencia de la provisión ambiental de nutrientes (evidenciada como el rendimiento de cada cultivo sin fertilizar). El objetivo de incluir la franja sin fertilizar fue evaluar las respuestas de los tratamientos a través del índice ambiental de los rendimientos del control sin fertilizar y calcular el beneficio adicional de los tratamientos versus el beneficio del control sin fertilizar.

Las fuentes de fertilizantes fueron urea (46N-0P-0K-0S), fosfato monoamónico (12N-52P-0K-0S), superfosfato triple (0N-46P-0K-0S) y sulfato de calcio (0N-0P-0K-23.5S). Las fuentes se mezclaron previo a la fertilización para obtener la concentración de nutrientes deseada en cada tratamiento. Para todos los tratamientos, los fertilizantes se incorporaron inmediatamente

previo a la siembra de cada cultivo utilizando la máquina sembradora del productor.

2.3. Mediciones de rendimiento

Cada parcela se cosechó con la cosechadora utilizada por el productor en el lote y luego se transfirió a una tolva con báscula para obtener el peso húmedo del grano cosechado. Para cada

parcela se tomó una submuestra de 400 g de granos para estimar la humedad relativa utilizando un higrómetro de mano. Los rendimientos de todos los cultivos se expresaron como Mg ha⁻¹ corregido a los valores de humedad relativa comercial de referencia de 13,5 % para soja y soja 2a, 14 % para trigo y 14,5 % para maíz.

Tabla 2. Dosis de nutrientes aplicadas mediante fertilización en cada cultivo de dos rotaciones de cultivos de tres años (soja-trigo/soja 2^a-maíz) para cada tratamiento (TYP, SUFF, SUFF+S e INT, más la franja sin fertilizar ZERO) para un experimento de seis años de duración (2014/2015 - 2019/2020) en siete sitios con influencia de napa freática en la Cuenca "A" del Salado de la Pampa Interior argentina.

Tratamiento	ZERO			TYP			SUFF			SUFF+S			INT		
Dosis de nutriente (kg ha ⁻¹)															
Cultivo	N	P	S	N	P	S	N	P	S	N	P	S	N	P	S
Soja	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	10	15	0	10	15
Trigo	0	0	0	50	14	0	70	20	0	70	20	15	80	35	15
Soja 2 ^a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maíz	0	0	0	50	14	0	70	20	0	70	20	15	80	35	15

2.4. Análisis de datos

2.4.1. Efectos de los tratamientos sobre el rendimiento a nivel de cultivo

Los rendimientos relativos de cada cultivo para las franjas control en cada sitio se calcularon como el rendimiento de cada cultivo en cada ciclo de rotación relativo al rendimiento promedio de ese cultivo en ese ciclo de rotación considerando todos los sitios. Cada sitio se caracterizó a través de un índice ambiental de la franja testigo sin fertilizar calculado como el rendimiento relativo promedio de todos los cultivos a lo largo de los dos ciclos de rotación.

El rendimiento de los cultivos individuales dentro de la rotación completa se analizó utilizando modelos de efectos mixtos (paquete 'sommer') en el software R (R Core Team, 2020) siguiendo a Onofri et al. (2016). El modelo ajustado fue:

$$\text{Rendimiento} = \text{Ciclo} + \text{Tratamiento} + \text{Sitio} + \text{Sitio:Bloque} + \text{Sitio:Tratamiento:Ciclo} + \text{Error}$$

Donde Rendimiento es el vector de las observaciones fenotípicas, Ciclo y Tratamiento son los efectos fijos, Sitio, Bloque dentro del Sitio, la interacción entre Sitio, Tratamiento y Ciclo y el Error son aleatorios. La varianza del error residual se modeló con una estructura de simetría compuesta. Se utilizó el mismo modelo, pero con todos los efectos aleatorios, para estimar los componentes de la varianza. Se

estimó la contribución de los factores y sus interacciones a la varianza total del rendimiento. Los rendimientos de cada cultivo en cada ciclo y en cada sitio se compararon entre tratamientos de fertilización utilizando la media estimada y el error estándar de la media (considerando la estructura de efectos aleatorios del modelo).

Para comprender mejor el efecto de los tratamientos de fertilización sobre el rendimiento de cada cultivo a través del ambiente, se representó el rendimiento de cada tratamiento en cada sitio y en cada ciclo respecto al rendimiento de la franja ZERO. Para conocer si hubo un efecto positivo de la fertilización sobre el rendimiento a través de los ambientes, se evaluó si la ordenada al origen de la regresión lineal de cada tratamiento fue diferente de 0 a través de una prueba F (alfa = 0.05). Para determinar si el efecto de la fertilización siguió a la oferta de ambiental de recursos o si, en cambio, fue mayor en ambientes de bajo o alto rendimiento, se comparó la pendiente de la regresión lineal versus la relación 1:1 (pendiente = 1) también mediante una prueba F (alfa = 0,05). Además, se evaluó la posibilidad de ajustar un modelo único para evaluar las diferencias en las respuestas entre los tratamientos. Se utilizó GraphPad Prism (GraphPad Prism versión 8.0.1 para Windows) para trazar las regresiones y realizar las

comparaciones estadísticas de los modelos lineales.

2.4.2. Relaciones entre las variables edáficas y los efectos de los tratamientos sobre el rendimiento a nivel de secuencia completa

Se evaluó la respuesta relativa del rendimiento a los incrementos de fertilización consecutivos. En cada sitio, el rendimiento relativo de cada cultivo de (i) el tratamiento TYP se relativizó con la franja ZERO (TYP/ZERO), (ii) el tratamiento SUFF se relativizó con el tratamiento TYP (SUFF/TYP), (iii) el tratamiento SUFF+S se relativizó con el tratamiento SUFF (SUFF+S/SUFF), y (iv) el tratamiento INT se relativizó con el tratamiento SUFF+S (INT/SUFF+S). Luego, los efectos relativos de los tratamientos sobre el rendimiento a lo largo de los dos ciclos de rotación se consideraron como el rendimiento relativo promedio entre cada par de tratamientos consecutivos.

Para evitar los efectos de la multicolinealidad entre las variables edáficas, se realizó un análisis de correlación múltiple entre todas las variables edáficas. Esto permitió seleccionar las variables ambientales con baja o nula correlación con otras variables (pH, ESP, S SO₄⁻ y P-Bray), así como las variables más correlacionadas con el mayor número de otras variables (%Arena y MOrg), mientras que se pudo descartar el resto de las variables que presentaron alta multicolinealidad, pero con menor correlación que Arena% y MOrg (%Limo, %Arcilla, Nan, N NO₃⁻). Luego, se evaluó la relación entre los efectos relativos de cada tratamiento sobre el rendimiento y las variables edáficas mediante un análisis de correlación usando el paquete “corrplot” en R y un análisis de componentes principales usando la función incorporada “prcomp” en R y los paquetes “ggfortify” y “factoextra” en R para la visualización.

Se realizó un análisis gráfico de burbujas para dilucidar aún más la relación entre los efectos relativos de los tratamientos sobre el rendimiento y las variables edáficas. P-Bray y %Arena fueron las variables edáficas seleccionadas ya que no estaban correlacionadas entre sí y contribuyeron en gran medida a la varianza total dentro de los dos primeros componentes principales del análisis de componentes principales. Los efectos relativos de los tratamientos sobre el rendimiento para cada comparación entre tratamientos consecutivos se cuantificaron según los diámetros de las burbujas y se graficaron en un

gráfico de dos ejes que combinaba P-Bray (ppm) y Arena (%).

2.4.3. Efectos de los tratamientos sobre el beneficio económico

Los precios mensuales de granos y fertilizantes de octubre de 2012 a octubre de 2022 se obtuvieron de Agroseries CREA (www.crea.org.ar/agroseries-app/), que resume los precios promedio de los principales proveedores de fertilizantes y compradores de granos de Argentina. Para estimar el precio de cada nutriente se consideraron los fertilizantes N, P y S más utilizados en Argentina (urea, fosfato monoamónico y sulfato de calcio). Los impuestos a la exportación (retenciones) se descontaron del precio de cada grano para reflejar el precio de venta real para los productores. En promedio, para la soja, el trigo y el maíz, durante el período considerado, las retenciones representaron aproximadamente el 20% del precio del grano. Los precios de granos y fertilizantes calculados fueron el promedio, el percentil 5 (P5), el percentil 50 (P50) y el percentil 95 (P95).

El beneficio adicional de cada tratamiento frente al ZERO sin fertilizar se calculó como el beneficio adicional promedio de todos los cultivos a lo largo de los dos ciclos de rotación. Para cada parcela en cada cultivo, el ingreso adicional se calculó como la diferencia de rendimiento por hectárea versus la franja ZERO multiplicada por el precio promedio del grano y el costo adicional se calculó como la masa de nutrientes aplicada por hectárea multiplicada por el costo promedio de los nutrientes. Se estimó la ganancia adicional promedio de cada tratamiento, y se compararon los tratamientos mediante un análisis de varianza en cada sitio (considerando el diseño de bloques completos al azar en cada sitio). Se realizó una comparación adicional a nivel regional, considerando cada sitio como un bloque y las repeticiones dentro de cada sitio como sub-réplicas. Los análisis de varianza se realizaron utilizando InfoStat versión 2020 (Di Rienzo et al., 2020). Se realizó un análisis de sensibilidad del beneficio adicional para cada tratamiento considerando escenarios de valores relativos de precios de granos versus precios de fertilizantes en lugar de precios promedio; los escenarios considerados (percentiles de precios Grano_Fertilizantes) fueron P95_P5, P95_P50, P95_P95, P50_P50, P5_P5, P50_P95 y P5_P95. Se realizaron

escenarios para cada sitio y también a nivel regional.

2.4.4. Efecto residual de los tratamientos sobre el rendimiento del cultivo de soja luego de los dos ciclos de rotación

En cada uno de los cinco sitios en los que se sembró y cosechó un cultivo de soja manejado homogéneamente en las parcelas de cada tratamiento, se calculó el rendimiento promedio para cada tratamiento. Se realizó un análisis de varianza para analizar el efecto de los tratamientos sobre el rendimiento a nivel regional (incluyendo ZERO como tratamiento) considerando cada sitio como un bloque y utilizando InfoStat versión 2020. Se realizó una prueba de comparación múltiple de medias para evaluar diferencias entre tratamientos.

3. Resultados

3.1. Efectos de los tratamientos sobre el rendimiento a nivel de cultivo

A través de todos los sitios y ciclos, el rendimiento de ZERO varió de 2,5 a 5,8 Mg ha⁻¹ para soja, de 1,8 a 4,7 Mg ha⁻¹ para trigo, de 2,2 a 5,3 Mg ha⁻¹ para soja DC y de 5,6 a 12,0 Mg ha⁻¹ para maíz (Tabla 3). Existió una amplia variación de rendimiento de ZERO entre los sitios, con un

sitio (General Pinto) mostrando rendimientos considerablemente más altos que el resto (reflejados en el índice ambiental).

El tratamiento de fertilización, el sitio y la interacción entre sitio x tratamiento x ciclo explicaron la mayor parte de la variación del rendimiento en los cultivos (Fig. 2). Sin embargo, la influencia relativa de los factores que explicaron la variación del rendimiento difirió entre cultivos (Fig. 2). Si bien el tratamiento de fertilización explicó el 27 % de la variación del rendimiento de trigo, su influencia sobre el rendimiento fue considerablemente menor en el maíz (5 %), la soja (6 %) y la soja 2a (3 %). Por el contrario, estos otros cultivos presentaron mayor influencia del sitio sobre el rendimiento del cultivo (34% para maíz, 61% para soja y 62% para soja 2a) que para el caso del trigo (18%). Finalmente, la interacción múltiple sitio x tratamiento x ciclo fue importante en todos los cultivos, pero sobre todo en maíz (50%), seguido de trigo (35%) y con menor magnitud para soja y soja 2a (19% y 30%, respectivamente). En la mayoría de los casos, con algunas excepciones, los rendimientos fueron mayores para el INT y menores para el TYP que para el resto de los tratamientos, aunque las diferencias de rendimiento entre tratamientos variaron entre sitios y ciclos (Tabla 4).

Tabla 3. Rendimiento de franja ZERO sin fertilizar (Mg ha⁻¹) de cada cultivo e índice ambiental a través de los sitios para un experimento de seis años de duración (2014/2015 - 2019/2020) en siete sitios con la influencia de la napa freática en la Cuenca "A" del Salado de la Pampa Interior argentina.

Campaña	Año	Ciclo	Cultivo	Daireaux	Casbas	Salazar	30 de Agosto	Carlos Casares	Trenque Lauquen	General Pinto
2014/2015	1	1	Soja	3.6	4.0	3.7	4.5	3.4	2.7	5.8
2015/2016	2	1	Trigo	2.5	2.7	3.9	3.6	3.5	4.2	4.7
2015/2016	2	1	Soja 2 ^a	2.2	2.5	2.5	2.6	2.9	2.2	5.3
2016/2017	3	1	Maíz	7.1	8.4	9.7	9.9	7.6	7.8	7.1
2017/2018	4	2	Soja	2.7	3.3	2.5	3.5	2.8	3.5	5.3
2018/2019	5	2	Trigo	1.8	3.7	2.3	2.3	2.6	2.0	3.3
2018/2019	5	2	Soja 2 ^a	3.8	Frost	3.1	2.7	Frost	2.7	4.0
2019/2020	6	2	Maíz	6.6	5.6	5.8	6.6	6.6	5.8	12
Índice ambiental ^l				0.86	0.98	0.93	1.00	0.93	0.88	1.41

^lEstimado como el promedio del Rendimiento de ZERO en cada sitio dividido por el promedio de los Rendimientos de ZERO a través de los siete sitios a lo largo de los seis años de duración del experimento.

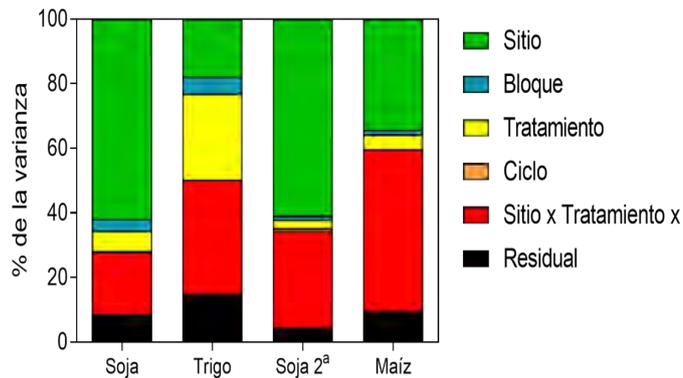


Figura 2. Contribución del sitio, bloque, tratamiento, ciclo y su interacción, y la contribución residual a la varianza total del rendimiento para soja, soja 2ª, trigo y maíz para un experimento de seis años de duración (2014/2015 - 2019/2020) en siete sitios con influencia de la napa freática en la Cuenca "A" del Salado de la Pampa Interior argentina. Solo se muestra la interacción en la que existió contribución a la varianza.

Tabla 4. Rendimiento promedio y error estándar de la media en cada cultivo de dos rotaciones de cultivos de tres años (soja-trigo/soja 2ª-maíz) para cada tratamiento (TYP, SUFF, SUFF+S e INT, más la franja sin fertilizar ZERO) para un experimento de seis años de duración (2014/2015 - 2019/2020) en siete sitios con influencia de la napa freática en la Cuenca "A" del Salado de la Pampa Interior argentina.

Cultivo	Ciclo	Tratamiento	Daireaux	Casbas	Salazar	30 de Agosto	Carlos Casares	Trenque Lauquen	General Pinto	
Soja	1	TYP	3.6 (0.1)	4.2 (0.1)	4.0 (0.2)	4.4 (0.1)	3.6 (0.1)	2.8 (0.4)	5.7 (0.1)	
		SUFF	3.8 (0.2)	4.1 (0.1)	4.2 (0.3)	4.5 (0.1)	4.2 (0.1)	3.1 (0.5)	5.9 (0.1)	
		SUFF+S	4.3 (0.2)	4.6 (0.1)	3.8 (0.2)	4.7 (0.1)	3.8 (0.1)	3.4 (0.2)	5.8 (0.1)	
		INT	4.2 (0.1)	4.6 (0.1)	4.5 (0.2)	4.8 (0.1)	4.3 (0.1)	3.7 (0.4)	5.8 (0.1)	
	2	TYP	2.7 (0.1)	3.4 (0.1)	3.3 (0.1)	3.6 (0.2)	3.2 (0.1)	4.3 (0.1)	5.8 (0.1)	
		SUFF	3.4 (0.4)	3.6 (0.1)	3.6 (0.1)	4.1 (0.2)	3.9 (0.5)	4.6 (0.1)	5.9 (0.1)	
		SUFF+S	3.2 (0.2)	3.7 (0.1)	3.6 (0.4)	4.1 (0.2)	4.3 (0.5)	4.7 (0.1)	5.9 (0.1)	
		INT	3.2 (0.1)	3.9 (0.1)	4.2 (0.1)	4.3 (0.1)	4.5 (0.2)	5.0 (0.1)	6.2 (0.1)	
		Trigo								
		Trigo	1	TYP	3.6 (0.2)	3.8 (0.2)	5.1 (0.3)	4.6 (0.2)	4.8 (0.1)	5.7 (0.4)
SUFF	3.8 (0.1)			3.6 (0.2)	5.6 (0.1)	4.7 (0.1)	4.9 (0.1)	5.7 (0.6)	5.8 (0.3)	
SUFF+S	4.6 (0.1)			5.3 (0.2)	5.8 (0.5)	4.9 (0.1)	5.6 (0.1)	6.1 (0.6)	5.0 (0.4)	
INT	5.0 (0.1)			6.5 (0.3)	5.9 (0.1)	5.2 (0.1)	6.3 (0.1)	7.0 (0.5)	5.2 (0.2)	
2	TYP		4.2 (0.1)	5.2 (0.2)	5.5 (0.1)	3.9 (0.1)	3.8 (0.1)	4.4 (0.1)	4.9 (0.1)	
	SUFF		4.4 (0.1)	6.2 (0.2)	5.5 (0.1)	4.5 (0.1)	4.5 (0.3)	4.8 (0.2)	5.2 (0.1)	
	SUFF+S		4.8 (0.1)	6.6 (0.1)	5.7 (0.2)	4.8 (0.1)	5.0 (0.1)	5.1 (0.1)	5.2 (0.1)	
	INT		5.0 (0.1)	7.3 (0.6)	5.6 (0.3)	5.3 (0.2)	5.7 (0.1)	5.7 (0.1)	5.4 (0.3)	
	Soja 2ª									
	Soja 2ª		1	TYP	2.1 (0.1)	2.4 (0.1)	2.5 (0.1)	2.7 (0.1)	2.9 (0.1)	2.6 (0.1)
SUFF		2.0 (0.1)		2.3 (0.1)	2.5 (0.1)	2.8 (0.1)	3.1 (0.2)	2.8 (0.3)	5.2 (0.1)	
SUFF+S		3.1 (0.1)		3.0 (0.1)	2.7 (0.1)	2.8 (0.1)	2.9 (0.2)	2.9 (0.2)	5.4 (0.2)	
INT		3.0 (0.1)		3.1 (0.1)	2.6 (0.1)	3.0 (0.1)	2.9 (0.2)	3.0 (0.2)	5.3 (0.1)	
2		TYP	1.9 (0.1)	Helada	3.1 (0.1)	3.1 (0.1)	Helada	2.6 (0.1)	3.3 (0.1)	
		SUFF	1.7 (0.3)	Helada	3.1 (0.2)	3.2 (0.1)	Helada	2.7 (0.3)	3.6 (0.1)	
		SUFF+S	1.9 (0.2)	Helada	3.5 (0.1)	3.2 (0.2)	Helada	3.1 (0.2)	3.8 (0.1)	
		INT	2.1 (0.1)	Helada	3.6 (0.1)	3.4 (0.2)	Helada	3.4 (0.2)	3.9 (0.1)	
		Maíz								
		Maíz	1	TYP	8.3 (0.7)	10.4 (0.1)	10.7 (0.1)	11.3 (0.5)	7.8 (0.4)	8.1 (0.2)
SUFF	9.7 (0.9)			10.9 (0.2)	11.3 (0.1)	11.8 (0.1)	7.7 (0.3)	9.1 (0.1)	9.5 (0.2)	
SUFF+S	9.5 (1.1)			11.1 (0.3)	11.1 (0.1)	11.9 (0.5)	7.8 (0.4)	9.7 (0.3)	9.8 (0.3)	
INT	10.1 (0.4)			11.0 (0.2)	11.2 (0.1)	11.6 (0.1)	7.9 (0.4)	9.9 (0.5)	10.(0.3)	
2	TYP		8.1 (0.2)	5.9 (0.1)	9.6 (0.2)	9.4 (0.1)	8.6 (0.1)	9.1 (0.2)	13.3 (0.1)	
	SUFF		8.5 (0.5)	6.6 (0.5)	10.3 (0.1)	9.4 (0.5)	9.1 (0.5)	10.0 (0.1)	13.3 (0.2)	
	SUFF+S		8.6 (0.3)	6.9 (0.2)	10.4 (0.5)	11.0 (0.9)	9.6 (0.2)	11.4 (0.4)	14.9 (0.6)	
	INT		9.5 (0.2)	7.2 (0.4)	10.6 (0.2)	12.8 (0.3)	9.7 (0.5)	12.4 (0.2)	14.2 (0.1)	

En general, el rendimiento aumentó con la fertilización respecto a ZERO en todos los cultivos y ambientes, independientemente del

tratamiento considerado (Fig. 3; todos los casos con ordenada al origen > 0; p < 0,05). Sin embargo, la magnitud de la respuesta del

rendimiento a la fertilización aumentó con los tratamientos más intensivos (soja: INT > SUFF+S = SUFF > TYP; DC soja: INT = SUFF+S > SUFF = TYP; trigo: INT > SUFF+S > SUFF > TYP, maíz: INT > SUFF+S > SUFF > TYP) (Fig. 3). Por lo general, la respuesta del rendimiento a la fertilización fue mayor en los ambientes con los rendimientos ZERO más bajos y viceversa, con algunas excepciones (Fig. 3, la mayoría de los

casos con pendientes de regresión < 1; $p < 0,05$). Además, también hubo diferencias en la magnitud de las respuestas al pasar de ZERO a INT entre cultivos, siendo mayor para trigo (promedio = +75%, rango = +11% a +145%) y maíz (promedio = +47%, rango = +4% a +116%) que para soja (promedio = +27%, rango = +1% a +70%) y soja 2a (promedio = +27%, rango = 0 a +76%).

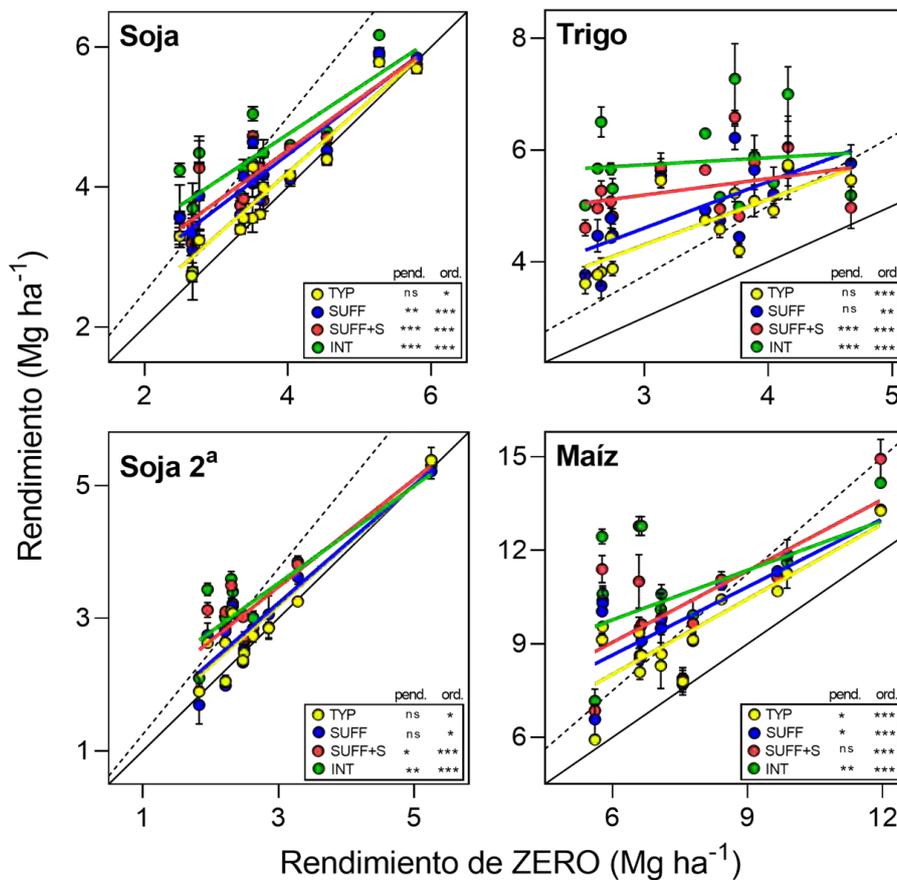


Figura 3. Rendimiento de grano de cada tratamiento de fertilización (TYP, SUFF, SUFF+S, INT) en función del rendimiento de las franjas ZERO no fertilizadas para soja, soja 2ª, trigo y maíz para un experimento de seis años de duración (2014/2015 - 2019/2020) en siete sitios con influencia de la napa freática en la Cuenca "A" del Salado de la Pampa Interior argentina. Cada punto representa la media de un sitio en un ciclo de rotación. Las barras de error muestran el error estándar de la media. Las líneas finas completas representan la relación 1:1. Las líneas punteadas finas representan la relación 1,25:1. Para todos los cultivos se muestran líneas independientes para cada tratamiento, ya que no fue posible ajustar un modelo único para todos los tratamientos ($p < 0.001$ para todos los cultivos). Para cada tratamiento en cada cultivo se muestra el resultado de la prueba F (alfa = 0.05) para la pendiente (H_0 : pendiente = 1) y la ordenada al origen (H_0 : intercepto = 0) (ns: no significativo; *: $p < 0,05$; **: $p < 0,01$; ***: $p < 0,001$).

3.2. Relaciones entre las variables edáficas y los efectos de los tratamientos sobre el rendimiento a nivel de secuencia completa

El % Arena, MORG y P-Bray explicaron la mayor parte de la variabilidad en el rendimiento

de ZERO y la respuesta del rendimiento a la fertilización entre sitios, con una menor contribución a la varianza de S-SO₄⁻, pH y ESP (63 % de la varianza explicada por los dos primeros componentes principales, Fig. 4 y Tabla S5). El análisis de componentes principales

separó Arena (%) y MOrg (Fig. 4), dos variables que estaban elevada y negativamente correlacionadas ($r = -0.78$, $p < 0.05$). Por el contrario, Arena (%) y MOrg estaban separados de P-Bray en el análisis de componentes principales (un ángulo de casi 90 grados con ambas variables) (Fig. 4), y no estaban correlacionados con esta variable ($p > 0.05$ en ambos casos). El rendimiento promedio de ZERO a lo largo de los dos ciclos de rotación se agrupó cerca de P-Bray en el análisis de componentes principales (Fig. 4) y estas dos variables se asociaron positivamente entre ellas ($r = 0.81$, $p < 0.05$).

Las respuestas relativas del rendimiento de los tratamientos de fertilización también se relacionaron con las variables ambientales. El rendimiento relativo de cada tratamiento

respecto al del inmediatamente menos intensificado (es decir, TYP/ZERO, SUFF/TYP, SUFF+S/SUFF, INT/SUFF+S) se agruparon por separado del Rendimiento de ZERO en el análisis de componentes principales (Fig. 4), pero solo INT/SUFF+S se correlacionó negativamente con el Rendimiento de ZERO ($r = -0.82$, $p < 0.05$) (Fig. S4). Además, SUFF+S/SUFF se agrupó cerca de Arena (%) (Fig. 4) con una correlación positiva muy alta ($r = 0.95$; $p < 0.05$) y, por el contrario, se agrupó de forma opuesta y se asoció negativamente con MOrg ($r = -0.84$, $p < 0.05$). Finalmente, TYP/ZERO, SUFF/TYP e INT/SUFF+S se agruparon en sentido opuesto a P-Bray (Fig. 4), pero solo SUFF/TYP ($r = -0.81$, $p < 0.05$) e INT/SUFF+S ($r = -0.78$, $p < 0.05$) se asociaron negativamente con esta variable edáfica.

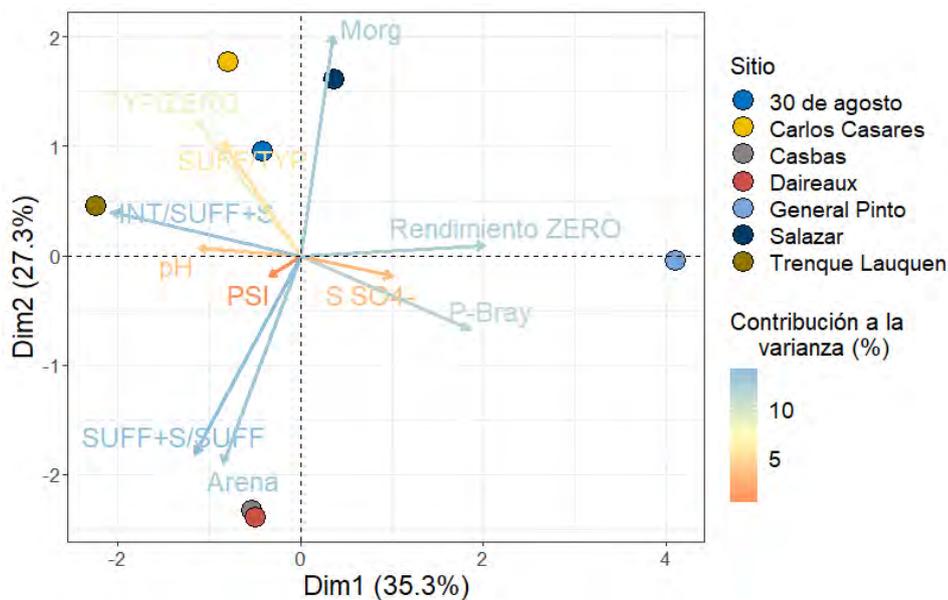


Figura 4. Análisis de componentes principales. Los experimentos en siete sitios (colores punteados) a lo largo de seis años (2014/2015 – 2019/2020) en la Cuenca “A” del Salado de la Pampa Interior de Argentina están representados a través de vectores según variables edáficas (MOrg, Arena, P-Bray, pH, S SO₄⁻ y ESP), el índice ambiental determinado por el rendimiento relativo de las franjas no fertilizadas a lo largo de los seis años (Rendimiento ZERO) y el aumento relativo del rendimiento entre tratamientos de fertilización consecutivos a lo largo de los seis años (TYP/ZERO, SUFF/TYP, SUFF+S/SUFF, INT/SUFF+S). La longitud y los colores de los vectores representan la contribución a la varianza de cada variable con respecto a la varianza total de los dos primeros componentes principales (Dim1, Dim 2).

Se analizó el aumento relativo del rendimiento entre tratamientos con niveles de fertilización cada vez más altos frente a la variación de P-Bray y Arena (%) entre sitios (Fig. 5). Los aumentos de rendimiento relativo fueron considerablemente mayores para TYP/ZERO (rango 10–32 %, promedio 20 %) que para las otras comparaciones de tratamientos (rango 1–15 %,

promedio 6 %). El aumento relativo del rendimiento fue mayor en los sitios con una combinación de bajo % Arena y bajo P-Bray para TYP/ZERO, SUFF/TYP e INT/SUFF+S, pero se observó lo contrario para SUFF+S/SUFF, donde los aumentos de alto rendimiento se especialmente en sitios con altos valores de Arena (%).

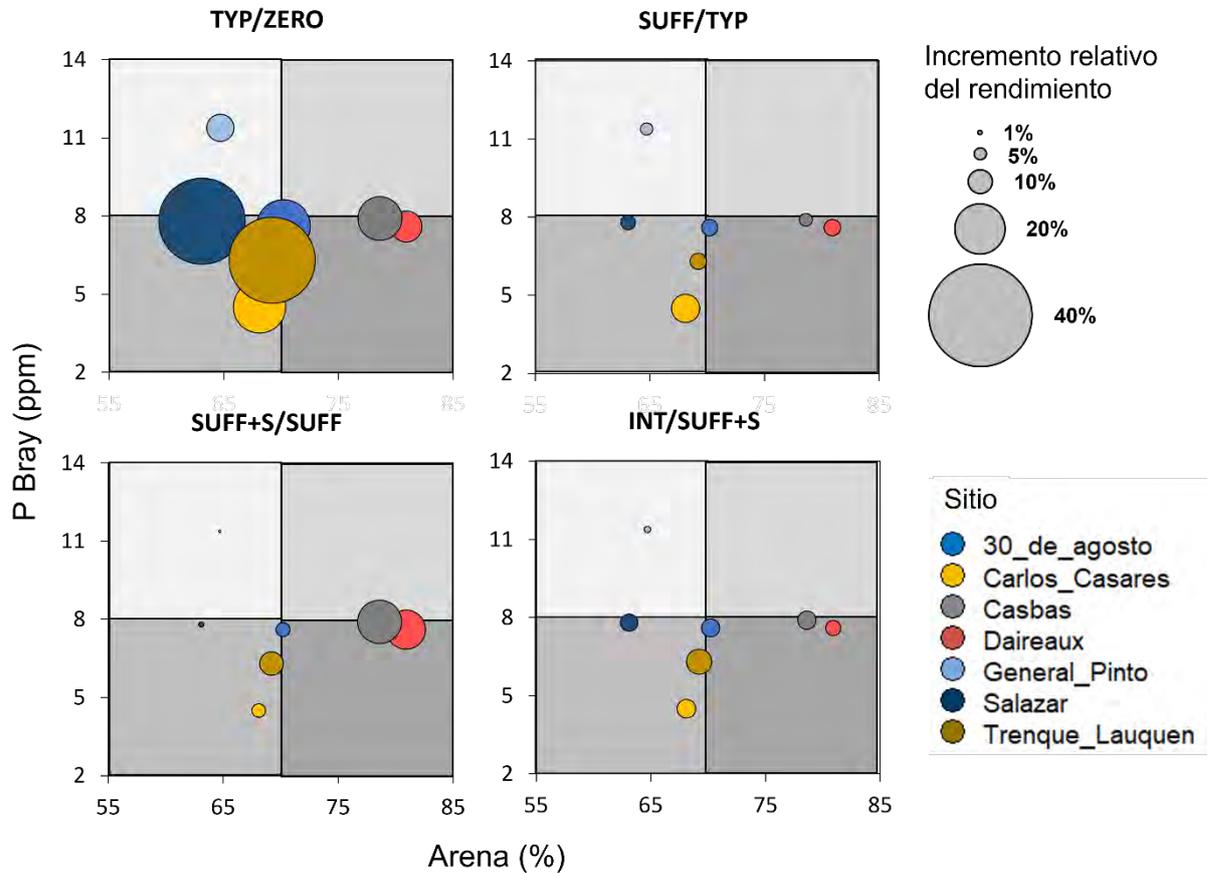


Figura 5. Gráficos de burbujas para el aumento relativo del rendimiento entre dos tratamientos de fertilización consecutivos (TYP/ZERO, SUFF/TYP, SUFF+S/SUFF, INT/SUFF+S) para sitios con diferentes combinaciones de P-Bray (ppm) y Arena (%) para un experimento de seis años de duración (2014/2015 – 2019/2020) en la Cuenca “A” del Salado de la Pampa Interior Argentina. Todos los sitios tuvieron la influencia de la napa freática. El aumento relativo del rendimiento se expresa como el diámetro de la burbuja y se consideraron los dos ciclos de tres años de una rotación típica de soja-trigo/soja 2^a-maíz para cada estrategia de fertilización. Los cuadrantes separan grupos de sitios con valores contrastantes de P-Bray (ppm) y Arena (%).

3.3. Efectos de los tratamientos sobre el beneficio económico

En todos los sitios, todas las estrategias de fertilización tuvieron beneficios positivos versus el “Control” no fertilizado ($p < 0.001$). Además, el beneficio económico aumentó a medida que se intensificó la fertilización, aunque las diferencias no siempre fueron significativas entre los tratamientos dentro de los sitios. Sin embargo, en seis de los siete sitios, el beneficio económico de SUFF+S fue mayor que el obtenido con TYP ($p < 0,05$) y el mismo efecto fue evidente para INT

versus TYP ($p < 0,01$). A pesar de una clara tendencia que indica mayores beneficios para INT versus SUFF+S, solo un sitio presentó diferencias significativas entre estos dos tratamientos (Fig. 6). Sin embargo, al considerar la escala regional, aumentar los niveles de fertilización incrementó significativamente el beneficio económico (INT > SUFF+S > SUFF > TYP) ($p < 0.05$), rindiendo hasta 360 U\$S ha⁻¹ año⁻¹ adicionales para INT cuando comparado con el “Control” sin fertilizar y 187 U\$S ha⁻¹ año⁻¹ en comparación con el tratamiento TYP.

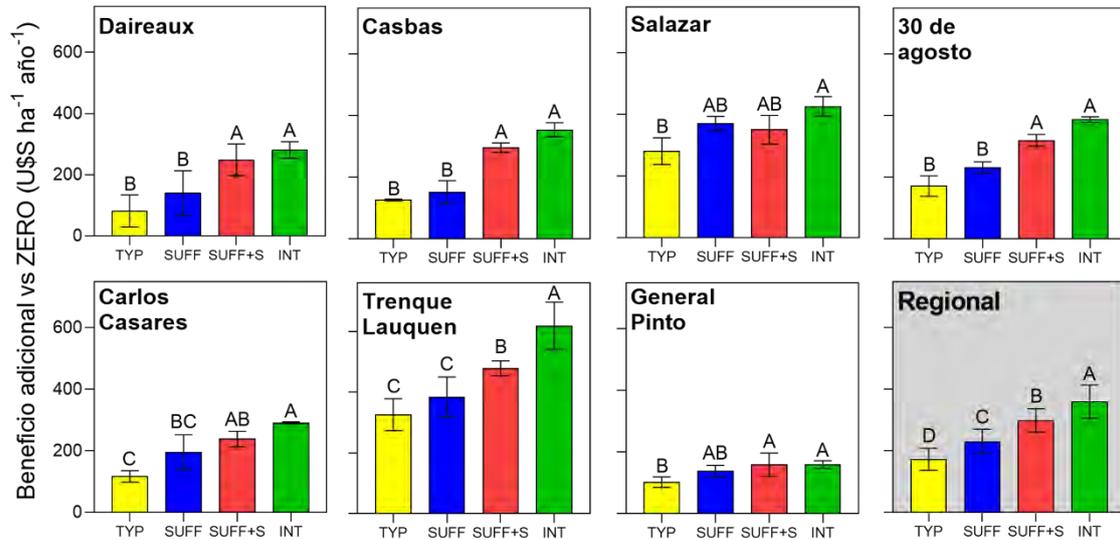


Figura 6. Beneficio económico adicional después de dos ciclos de rotación de cada tratamiento de fertilización (TYP, SUFF, SUFF+S, INT) versus las franjas ZERO no fertilizadas para cada sitio de un experimento de seis años de duración (2014/2015 - 2019/2020) en la Cuenca “A” del Salado de la Pampa Interior Argentina y el promedio regional (promedio de todos los sitios). Todos los sitios tuvieron la influencia de la napa freática. Cada barra muestra el beneficio adicional total después de dos ciclos de rotación (soja-trigo/soja 2^a-maíz). Las barras de error muestran el error estándar de la media. En cada sitio y para el promedio regional, letras diferentes muestran diferencias entre el valor medio para la prueba LSD Fisher ($p < 0.05$). Se consideraron los promedios de diez años (2012-2022) de los precios de los granos (soja, trigo y maíz; incluidos los impuestos a la exportación) y los precios de los fertilizantes (urea, fosfato monoamónico y sulfato de calcio) en Argentina.

A pesar de que el beneficio adicional fue sensible a los precios relativos de los cereales y los fertilizantes, casi ninguna combinación de precios resultó en una respuesta negativa a la fertilización (Fig. 7). Con precios de granos versus fertilizantes relativamente favorables (es decir, P95_P5 y P95_P50) e incluso con altos precios tanto de granos como de fertilizantes (P95_P95), el beneficio económico aumentó con niveles de fertilización más intensivos (INT > SUFF+S > SUFF > TYP). Por el contrario, con

precios de granos versus fertilizantes relativamente desfavorables (es decir, P5_P95 y P50_P95) en general no existieron diferencias, pero en ciertas ocasiones los beneficios fueron menores con intensidades de fertilización más altas. Aunque la dirección de las respuestas mencionadas fue consistente entre los sitios y se reflejó a escala regional, las magnitudes de las respuestas difirieron y siguieron las respuestas promedio de los sitios descritas anteriormente (Fig. 6).

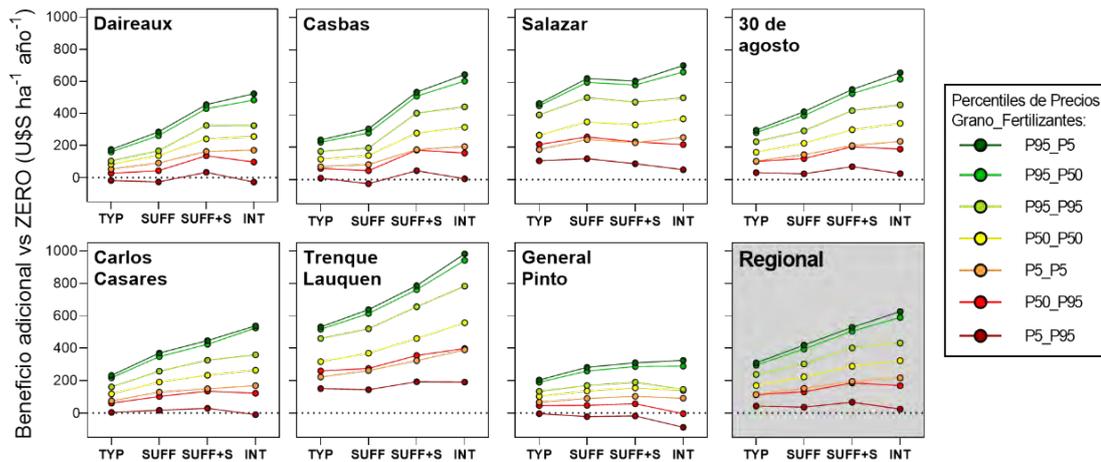


Figura 7. Análisis de sensibilidad del beneficio adicional después de dos ciclos de rotación de cada tratamiento de fertilización (TYP, SUFF, SUFF+S, INT) versus las franjas ZERO no fertilizadas para cada sitio de un experimento de seis años de duración (2014/2015 - 2019/2020) en la Cuenca “A” del Salado de la Pampa Interior de Argentina y el promedio regional (promedio de todos los sitios). Todos los sitios tuvieron la influencia de un nivel freático. La línea punteada muestra el umbral de beneficio adicional cero. Se consideraron diferentes situaciones de precios relativos de granos y fertilizantes en base a los percentiles de los datos de diez años (2012-2022) de los precios de los granos (soja, trigo y maíz; incluidos los impuestos a la exportación) y los precios de los fertilizantes (urea, fosfato monoamónico y sulfato de calcio) en Argentina. Los puntos muestran la ganancia adicional para los percentiles de precios de granos seleccionados (primer número) y fertilizantes (segundo número).

3.4. Efecto residual de los tratamientos sobre el rendimiento del cultivo de soja luego de los dos ciclos de rotación

A escala regional, fue evidente el efecto residual de los tratamientos sobre el rendimiento del cultivo de soja subsiguiente a los dos ciclos de rotación (Fig. 8; $p < 0,05$). Los tratamientos de fertilización crecientemente intensivos durante los dos ciclos de rotación anteriores se tradujeron en mayores rendimientos de la soja subsiguiente, ya que INT mostró el rendimiento más alto (4,5 Mg ha⁻¹), seguido de SUFF+S (4,3 Mg ha⁻¹), SUFF (4,3 Mg ha⁻¹), TYP (3,9 Mg ha⁻¹) y ZERO (3,6 Mg ha⁻¹). Aunque el rendimiento de soja de SUFF y SUFF+S no fue estadísticamente diferente de INT, este último tuvo los valores de rendimiento de soja más altos en la mayoría de los sitios y fue el único tratamiento con rendimientos de soja siempre superiores a 4,0 Mg ha⁻¹.

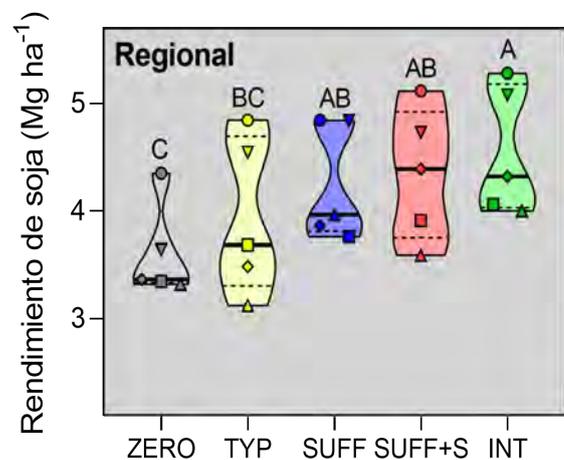


Figura 8. Gráfico de violín que muestra el efecto a escala regional en la Cuenca “A” del Salado de la Pampa Interior Argentina de los cuatro tratamientos de fertilización (TYP, SUFF, SUFF+S, INT) y las franjas ZERO sin fertilizar después de dos ciclos de rotación (seis años, 2014/2015 - 2019/2020) sobre el rendimiento de un cultivo de soja sembrado en el año subsiguiente (2020/2021) y con igual fertilización para todos los tratamientos. Cada punto representa la media de un sitio. Todos los sitios tuvieron la influencia de la napa freática. Para cada tratamiento, la línea recta llena indica la mediana del rendimiento y las líneas punteadas indican los percentiles 25 y 75 del rendimiento.

4. Discusión

Este trabajo analizó el impacto de las estrategias de fertilización a mediano plazo sobre la productividad, el beneficio económico y el efecto residual de largo plazo en varios ambientes con influencia de la napa freática en la Cuenca “A” del Salado de la Pampa Interior. Una fertilización equilibrada e intensificada con N, S y P (INT) aumentó los rendimientos y maximizó el beneficio económico para los productores a escala regional. De hecho, una adopción masiva de INT por parte de los productores representaría un aumento general del rendimiento del 19 % con un beneficio adicional que oscilaría entre US\$ 356 y US\$ 641 millones anuales en comparación con los esquemas de fertilización típicos (TYP) implementados (considerando que entre el 50 y el 90 % de los 3,8 millones de hectáreas actuales de tierras de cultivo en el área de la Cuenca “A” del Salado están bajo la influencia de una capa freática; García et al., 2019). Sin embargo, muchos productores aún adoptan un esquema de fertilización menos intensificado (TYP) debido a una gran aversión al riesgo (Bocquého et al., 2013; Gonzalez-Ramirez et al., 2018; Monjardino et al., 2015; Pellegrini et al., 2022). Aquí argumentamos que, de acuerdo con el análisis de sensibilidad realizado, hay muy poco riesgo económico derivado de la adopción de estrategias de fertilización más intensivas en sistemas de cultivo con la influencia de la napa freática (Fig. 7). El trabajo colaborativo de científicos y productores para establecer experimentos a campo con la tecnología agrícola disponible permite una transferencia instantánea de información valiosa a los sistemas de producción de cultivos (Lacoste et al., 2022). De hecho, los productores de CREA Oeste ya han adoptado estrategias de fertilización más equilibradas tras los resultados de estos experimentos. En comparación con el inicio de este experimento de mediano plazo, la fertilización S (SUFF+S) en sus cultivos aumentó del 6% al 60% del área, mientras que la reposición de P (INT) aumentó del 1% al 10% del área (basado en encuestas realizadas en 2014 y 2020 en fincas que cubren aproximadamente 150.000 hectáreas).

Aunque la fertilización tuvo una influencia importante sobre el rendimiento, hubo un gran efecto de la interacción sitio × tratamiento × ciclo (Fig. 2), lo que evidencia la importancia de comprender el ambiente de producción para orientar las decisiones de manejo (Meynard et al., 1981; Monzón et al., 2018). Esta interacción fue,

en parte, explicada por diferencias en las variables edáficas entre los sitios analizados. En el área de estudio sería relevante caracterizar la textura, la MOrg y el P-Bray para decidir la estrategia de fertilización a mediano plazo (Fig. 4 y 5). No es sorprendente que los valores bajos de P-Bray se asociaran con mayores respuestas a la fertilización con P (Sucunza et al., 2018), ya sea después de aumentar la dosis hasta un nivel de suficiencia (SUFF) o incluso en niveles cercanos a la reposición (INT). Además, altos valores de % de arena y bajos valores de MOrg determinaron respuestas significativas a la fertilización con S (al comparar los tratamientos SUFF+S y SUFF). Estas características del suelo determinan una baja capacidad de mineralización del S y, por lo tanto, aumentan la respuesta al S agregado por la fertilización. Por el contrario, S SO₄⁻ por sí solo no fue un buen predictor de esta respuesta como ya se ha encontrado en estudios previos (Carciochi et al., 2019; Pagani y Echeverría, 2011; Salvagiotti et al., 2012; Tisdale et al., 1986).

A pesar de los efectos generales discutidos anteriormente, la influencia de una estrategia de fertilización intensificada y equilibrada (INT) difirió entre cultivos específicos a lo largo de la secuencia, siendo mayor en trigo y maíz que en soja (Fig. 3) y obedeciendo a las respuestas esperadas de los cereales versus las leguminosas (Xiu et al., 2011). Siempre que la limitación hídrica sea muy baja o nula (Cossani y Sadras, 2018), el trigo y el maíz son cultivos que presentan una elevada respuesta a los diferentes nutrientes (Chuan et al., 2013; Salvagiotti y Miralles, 2008; Setiyono et al., 2010; Carciochi et al., 2020; Manenti et al., 2023); pero más aún a un programa de fertilización balanceado siguiendo la “ley del óptimo” donde todos los nutrientes se utilizan más eficientemente cuando se incrementa la disponibilidad del más limitante (Liebscher, 1895). Los cultivos de soja fijan nitrógeno de forma simbiótica y suelen estar limitados por la disponibilidad de P y S (Ferraris et al., 2002; Salvagiotti et al., 2004; Manenti et al., 2023). Finalmente, los cultivos de soja 2a suelen explorar una estación de crecimiento más acotada debido a la siembra tardía después de la cosecha del trigo. Esta situación reduce el rendimiento del cultivo (Andrade et al., 2015; Hansel et al., 2019) y disminuye los requerimientos generales de nutrientes (Salvagiotti et al., 2021). Es importante señalar que, en todos los cultivos, la respuesta a estrategias de fertilización más equilibradas e intensificadas (INT) disminuyó a medida que

aumentó el rendimiento de la franja no fertilizada (ZERO) (Fig. 3). Esto sugiere que (i) la fertilidad del suelo fue el principal factor definitorio del rendimiento en los sitios explorados en el trabajo, y (ii) en la Pampa Interior, una fertilización equilibrada puede satisfacer la mayoría de los requisitos cuando la fertilidad del suelo es reducida. Teniendo esto en cuenta, comprender la fertilidad intrínseca de un lote a través del rendimiento, las relaciones entre los índices espectrales y/o la concentración de nutrientes en franjas de cultivos de trigo o maíz no fertilizados versus fertilizados podría ayudar a predecir la respuesta a las estrategias de fertilización y contribuir a mejorar la eficiencia en el uso de fertilizantes (Mahajan et al., 2014; Carciochi et al., 2019).

Es importante resaltar algunas limitaciones de este estudio para comprender hasta qué punto los resultados de este estudio pueden extrapolarse a otras situaciones de campo. Primero, todos los sitios estudiados tuvieron la influencia de la napa freática, reduciendo las limitaciones de agua y aumentando el rendimiento potencial limitado por agua (Nosetto et al., 2009; Van Ittersum et al., 2013). Las respuestas del rendimiento en ambientes con limitaciones hídricas probablemente difieran de las descritas en este trabajo (Manenti et al., 2023). En segundo lugar, evaluamos el efecto de las estrategias de fertilización sobre la productividad y el resultado económico de la principal rotación de cultivos en la región. A la luz de los resultados obtenidos aquí para cada cultivo específico en la secuencia, podemos especular que las rotaciones basadas en cereales tendrían una mayor respuesta a la intensificación, mientras que rotaciones con mayor preponderancia de soja mostrarían lo contrario. Además, otras tecnologías de cultivo, como la fecha de siembra, la densidad o la elección del genotipo, podrían ayudar a ajustar el manejo para optimizar las respuestas a los fertilizantes (Foulkes et al., 1998; Boomsma et al., 2009; Ciampitti y Vyn, 2011; Bastidas et al., 2008; Batten y Khan, 1987; Bosaz et al., 2019; Cerrudo et al., 2017). Finalmente, si bien pudimos detectar un efecto residual en un cultivo de soja manejado de manera idéntica después de seis años de aplicar diversas estrategias de fertilización (un aumento del 15% para INT versus TYP; Fig. 8), se podrían esperar mayores respuestas residuales en cultivos de cereales (Andrade et al., 2017). Estas respuestas residuales deben considerarse de alguna manera para evaluar adecuadamente el beneficio adicional

derivado de la intensificación. Además, también se debería considerar el valor económico de un mayor nivel de P extractable disponible en el suelo por enriquecimiento (Correndo et al., 2015).

En general, los resultados de este trabajo sugieren la importancia de estudiar las variables del suelo (fertilidad física y química) afectadas por las diferentes estrategias de fertilización en el mediano plazo para comprender las causas de las respuestas observadas. No obstante, incluso al considerar todos estos aspectos significativos desde el punto de vista agronómico, es probable que las futuras mejoras de productividad para cerrar las brechas de rendimiento al nivel del cultivo individual y al nivel de secuencia de cultivos a partir de la adopción de prácticas de manejo adicionales (Guilpart et al., 2017), lograrían beneficios cada vez más marginales al compararlos con los observados en este trabajo. Sin embargo, sostenemos que la identificación de oportunidades para mejorar el rendimiento y el beneficio económico considerando el mediano y largo plazo que caracteriza la naturaleza de la producción agrícola debe basarse en la evaluación de prácticas en experimentos a campo adecuadamente diseñados.

5. Conclusión

En conclusión, esta investigación analizó el impacto a mediano plazo de las estrategias de fertilización sobre la productividad de los cultivos, el beneficio económico y los efectos residuales de largo plazo en varios ambientes con influencia de la napa freática en la Cuenca "A" del Salado de la Pampa Interior. Los resultados indican que un programa de fertilización equilibrado e intensificado con N, S y P (INT) aumentó los rendimientos y maximizó el beneficio económico para los productores a escala regional. Sin embargo, muchos productores aún adoptan esquemas de fertilización menos intensificados debido a la aversión al riesgo, algo no respaldado por el análisis de sensibilidad realizado. Debido a las respuestas diferenciales de la productividad de los cultivos entre los sitios, el estudio destaca la importancia de comprender el ambiente de producción para guiar las decisiones de manejo. En este sentido, resulta fundamental caracterizar las propiedades del suelo, como la textura, la MOrg y el P-Bray, para decidir sobre la estrategia de fertilización adecuada en regiones con suelos arenosos. El impacto de una estrategia de fertilización intensificada y equilibrada (INT)

difirió entre cultivos a lo largo de la secuencia, siendo mayor en trigo y maíz que en soja. En general, este trabajo brinda información valiosa para que los productores y los encargados de formular políticas adopten estrategias de fertilización más equilibradas e intensificadas que conduzcan a aumentar el rendimiento y el beneficio económico de los sistemas de cultivo a mediano y largo plazo.

Agradecimientos

Los autores reconocen la predisposición de los productores y asesores de “CREA Oeste” para participar en los talleres y discusiones de resultados de este proyecto, y su ayuda en los experimentos de campo. Asimismo, los autores agradecen a los técnicos a cargo de los experimentos de campo: Cecilia Justo, Diego Mendoza y Santiago Algorta.

Referencias

- Alsina S, Nosetto MD, Jobbágy EG. 2020. Database “napa”: first synthesis of the pampean water-table dynamic since 1950 to the present. *Ciencia de Suelo* 38: 262-273.
- Andrade JF, Satorre EH. 2015. Single and double crop systems in the Argentine Pampas: Environmental determinants of annual grain yield. *Field Crops Research* 177: 137-147.
- Andrade JF, Poggio SL, Ermácora M, Satorre EH. 2015. Productivity and resource use in intensified cropping systems in the Rolling Pampa, Argentina. *European Journal of Agronomy* 67: 37-51.
- Bastidas AM, Setiyono TD, Dobermann A, Cassman KG, Elmore RW, Graef GL, Specht JE. 2008. Soybean sowing date: The vegetative, reproductive, and agronomic impacts. *Crop Science* 48: 727-740.
- Batten GD, Khan MA. 1987. Effect of time of sowing on grain yield, and nutrient uptake of wheats with contrasting phenology. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 27: 881-887.
- Bocquého G, Jacquet F, Reynaud A. 2013. Expected utility or prospect theory maximisers? Assessing farmers’ risk behaviour from field-experiment data. *European Review of Agricultural Economics* 41: 135-172.
- Boomsma CR, Santini JB, Tollenaar M, Vyn TJ. 2009. Maize Morphophysiological Responses to Intense Crowding and Low Nitrogen Availability: An Analysis and Review. *Agronomy Journal* 101: 1426-1452. <https://doi.org/10.2134/agronj2009.0082>
- Bosaz LB, Gerde JA, Borrás L, Cipriotti PA, Ascheri L, Campos M, Bergallo S, Rotundo JL. 2019. Management and environmental factors explaining soybean seed protein variability in central Argentina. *Field Crops Research* 240: 34-43.
- Cakmak I. 2002. Plant nutrition research: Priorities to meet human needs for food in sustainable ways. *Plant and soil* 247: 3-24.
- Calviño P, Monzon JP. 2009. Farming systems of Argentina: yield constraints and risk management. In: Sadras VO, Calderini D, eds. *Crop physiology: Applications for genetic improvement and agronomy*. San Diego, California: Elsevier Academic Press. pp 51-70.
- Carciocchi WD, Reussi Calvo NIR, Wyngaard N, Divito GA, Eyherabide M, Echeverría HE. 2019. Prognosis and diagnosis of sulfur status in maize by plant analysis. *European Journal of Agronomy* 108: 1-10.
- Carciocchi WD, Salvagiotti F, Pagani A, Reussi Calvo NI, Eyherabide M, Sainz Rozas HR, Ciampitti I A. 2020. Nitrogen and sulfur interaction on nutrient use efficiencies and diagnostic tools in maize. *European Journal of Agronomy* 116: 126045.
- Cerrudo A, Martínez D, Izquierdo NG, Cirilo AG, Laserna MP, Reinoso L, Valentinuz O, Balbi C, Andrade FH. 2017. Environment, Management, and Genetic Contributions to Maize Kernel Hardness and Grain Yield. *Crop Science* 57: 2788-2798. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.12.0997>
- Chuan L, He P, Jin J, Li S, Grant C, Xu X, Qiu S, Zhao S, Zhou W, Estimating nutrient uptake requirements for wheat in China. *Field Crops Research* 146: 96-104. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.02.015>.
- Ciampitti IA, Vyn TJ. 2011. A comprehensive study of plant density consequences on nitrogen uptake dynamics of maize plants from vegetative to reproductive stages. *Field Crops Research* 121: 2-18. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.10.009>
- Ciampitti IA, García FO, Picone LI, Rubio G. 2011. Phosphorus budget and soil extractable dynamics in field crop rotations in Mollisols. *Soil Science Society of America Journal* 75: 131-142.
- Correndo AA, Boxler M, García FO. 2015. Economic analysis of fertilization management with focus on the long term. *Ciencia del Suelo* 33: 197-212.
- Correndo A. 2018. Variables asociadas a la respuesta a la fertilización con nitrógeno y fósforo en maíz y soja en región pampeana. MSc. Thesis, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina. (in Spanish)
- Cossani CM, Sadras VO. 2018. Water-nitrogen colimitation in grain crops. *Advances in Agronomy* 150: 231-274.
- Cuvaradic M, Tveitnes S, Krogstad T, Lombnæs P. 2004. Long-term effects of crop rotation and different fertilization systems on soil fertility and productivity. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, 54: 193-201.
- Díaz-Zorita M, Duarte GA, Grove JH. 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research* 65: 1-18.
- Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, Gonzalez L, Tablada M, Robledo CW. 2020. Infostat version 2020. Centro de Transferencia Infostat, FCA,

- Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. (<http://www.infostat.com.ar>).
- Eriksen, J. 2009. Soil sulfur cycling in temperate agricultural systems. *Advances in Agronomy* 102: 55-89.
- Ferraris G, Gutierrez Boem FH, Echeverria HE. 2002. Soybean crop response to fertilization. *IDIA XXI*, 3: 52-58. (in Spanish)
- Foulkes M, Sylvester-Bradley R, Scott R. 1998. Evidence for differences between winter wheat cultivars in acquisition of soil mineral nitrogen and uptake and utilization of applied fertilizer nitrogen. *The Journal of Agricultural Science* 130: 29-44. doi:10.1017/S0021859697005029
- García GA, García PE, Rovere SL, Bert FE, Schmidt F, Menéndez AN, Nosetto MD, Verdin A, Rajagopalan B, Arora P, Podestá GP. 2019. A linked modelling framework to explore interactions among climate, soil water, and land use decisions in the Argentine Pampas. *Environmental Modelling & Software* 111: 459-471. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.10.013>.
- Gonzalez-Ramirez J, Arora P, Podesta G. 2018. Using insights from prospect theory to enhance sustainable decision making by agribusinesses in Argentina. *Sustainability* 10: 2693. <https://doi.org/10.3390/su10082693>
- GraphPad Prism version 8.0.1 for Windows, GraphPad Software, San Diego, California USA, (www.graphpad.com).
- Guilpart N, Grassini P, Sadras VO, Timsina J, Cassman KG. 2017. Estimating yield gaps at the cropping system level. *Field Crops Research* 206: 21-32. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.02.008>.
- Hansel DSS, Schwalbert RA, Shoup DE, Holshouser DL, Parvej R, Prasad PVV, Ciampitti IA. 2019. A Review of Soybean Yield when Double-Cropped after Wheat. *Agronomy Journal* 111: 677-685. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.06.0371>
- Huang S, Zhang W, Yu X, Huan Q. 2010. Effects of long-term fertilization on corn productivity and its sustainability in an Ultisol of southern China. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 138: 44-50.
- INTA. 1989. Mapa de suelos de la Provincia de Buenos Aires. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina.
- IPNI. 2013. 4R de la Nutrición de Plantas: Un Manual para Mejorar el Manejo de la Nutrición de Plantas. Eds: Bruulsema TW, Fixen P, Sulewski G. 1st Ed. Acaasuso. International Plant Nutrition Institute. 140 pp. (In Spanish).
- Koritschoner JJ, Hulse JIW, Cuchietti A, Arrieta EM. 2023. Spatial patterns of nutrients balance of major crops in Argentina. *Science of The Total Environment* 858: 159863.
- Lacoste M, Cook S, McNee M, Gale D, Ingram J, Bellon-Maurel V, MacMillan T, Sylvester-Bradley R, Kindred D, Bramley R, Tremblay N, Longchamps L, Thompson L, Ruiz J, García FO, Maxwell B, Griffin T, Oberthür T, Huyghe C, Zhang W, McNamara J, Hall A. 2022. On-Farm Experimentation to transform global agriculture. *Nature Food* 3: 11-18. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00424-4>
- Lamers JP, Bruentrup M, Buerkert A. 2015. Financial performance of fertilization strategies for sustainable soil fertility management in Sudano-Saharan West Africa. 2: Profitability of long-term capital investments in rockphosphate. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 102: 149-165.
- Larrea G, Wyngaard N, Eyherabide M, Reussi Calvo N, Puricelli M, Barbieri P, Angelini H, Salvagiotti F, Sainz Rosas H. 2023. Cation nutrient reserves decline markedly under intensive cropping of Pampas Mollisols. *CATENA* 223: 206916.
- Liebscher G. 1895. Untersuchungen über die Bestimmung des Düngerbedürfnisses der Ackerböden und Kulturpflanzen. *Journal für Landwirtschaft* 43: 49-125. (In German).
- Mahajan GR, Sahoo RN, Pandey RN, Gupta VK, Dinesh K. 2014. Using hyperspectral remote sensing techniques to monitor nitrogen, phosphorus, sulphur and potassium in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Precision Agric* 15: 499-522. <https://doi.org/10.1007/s11119-014-9348-7>
- Manenti L, Macholdt J, Garcia FO, Rubio G. 2023. Resilience of maize, wheat and soybean cropping systems as affected by fertilization: Analysis of a long-term field network. *Agronomy Journal*, In press. <https://doi.org/10.1002/agj2.21325>
- Manna MC, Swarup A, Wanjari RH, Mishra B, Shahi, DK. 2007. Long-term fertilization, manure and liming effects on soil organic matter and crop yields. *Soil and Tillage Research* 94: 397-409.
- Melchiori RJ, Novelli LE, Gregorutti VC, Caviglia, OP. 2014. Stover Quality and Soil Organic Carbon in Long-Term Nitrogen-Fertilized Maize. *Agronomy Journal*, 106: 1709-1716.
- Meynard JMJ, Boiffin J, Caneill J, Sebillotte M. 1981. Elaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne crayeuse. II.-Types de réponse à la fumure azotée et application de la méthode du bilan prévisionnel. *Agronomie* 1: 795-806. (In French).
- Monjardino M, McBeath T, Ouzman J, Llewellyn R, Jones B. 2015. Farmer risk-aversion limits closure of yield and profit gaps: a study of nitrogen management in the southern Australian wheatbelt. *Agricultural Systems* 137: 108-118. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.04.006>.
- Monzón JP, P.A. Calviño PA, V.O. Sadras VO, J.B. Zubiurre JB, F.H. Andrade FH. 2018. Precision agriculture based on crop physiological principles improves whole-farm yield and profit: A case study. *European Journal of Agronomy* 99: 62-71. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.06.011>.
- Mueller ND, Gerber JS, Johnston M, Ray DK, Ramankutty N, Foley JA. 2012. Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature* 490: 254-257.
- NASA Power. National Aeronautics and Space Administration (NASA) Langley Research Center

- (LaRC) Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER) Project funded through the NASA Earth Science/Applied Science Program. NASA Power Project hourly 2.0.0 version. <<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>>. (Accessed 08 March 2023).
- Nosetto MD, Jobbágy EG, Jackson RB, Sznajder GA. 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crops Research* 113: 138-148.
- Nosetto MD, Jobbágy EG, Brizuela AB, Jackson RB. 2012. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 154: 2-11.
- Onofri A, Seddaiu G, Piepho HP. 2016. Long-term experiments with cropping systems: case studies on data analysis. *European Journal of Agronomy* 77: 223-235.
- Pagani A, Echeverría HE. 2011. Performance of Sulfur Diagnostic Methods for Corn. *Agronomy Journal* 103: 413-421. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0265>
- Paruelo JM, Guerschman JP, Verón SR. 2005. Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia Hoy* 15: 14-23.
- Pellegrini P, Alvarez Prado S, Monzon JP, Oesterheld M, Sadras VO. 2022. Spatial and temporal variation in drought types for wheat in Argentina and its association with actual yield and fertilization rate. *Field Crops Research* 280: 108469.
- R Core Team, 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. (<https://www.R-project.org/>).
- Rodríguez D, Sadras VO. 2011. Opportunities from integrative approaches in farming systems design. *Field Crops Research* 2: 137-141. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.05.022>
- Ros GH. 2012. Predicting soil N mineralization using organic matter fractions and soil properties: A re-analysis of literature data. *Soil Biology and Biochemistry* 45: 132-135.
- Salvagiotti F, Miralles DJ. 2008. Radiation interception, biomass production and grain yield as affected by the interaction of nitrogen and sulfur fertilization in wheat. *European Journal of Agronomy* 28: 282-290.
- Salvagiotti F, Gerster G, Bacigalupo S, Castellarín J, Galarza C, González N, Gudelj V, Novello O, Pedrol H, Vallone P. 2004. Residual and fresh effects of phosphorous and sulphur on soybean following wheat. *Ciencia del Suelo* 22: 92-101.
- Salvagiotti F, Ferraris G, Quiroga A, Barraco M, Vivas H, Prystupa P, Echeverría H, Gutiérrez Boem FH. 2012. Identifying sulfur deficient fields by using sulfur content; N:S ratio and nutrient stoichiometric relationships in soybean seeds. *Field Crops Research* 135: 107-115. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.07.011>
- Salvagiotti F, Magnano L, Ortez O, Enrico J, Barraco M, Barbagelata P, Condori A, Di Mauro G, Manlla A, Rotundo J, García FO, Ferrari M, Gudelj V, Ciampitti I. 2021. Estimating nitrogen, phosphorous, potassium, and sulfur uptake and requirement in soybean. *European Journal of Agronomy* 127, 126289. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126289>
- Scherer HW. 2001. Sulphur in crop production. *European Journal of Agronomy* 14: 81-111.
- Schomberg HH, Wietholter S, Griffin TS, Reeves DW, Cabrera ML, Fisher DS, Endale DM, Novak JM, Balkcom KS, Raper RL, Kitchen NR. 2009. Assessing indices for predicting potential nitrogen mineralization in soils under different management systems. *Soil Science Society of America Journal* 73: 1575-1586.
- Setiyono TD, Walters DT, Cassman KG, Witt C, Dobermann A. 2010. Estimating maize nutrient uptake requirements. *Field Crops Research* 118: 158-168. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.05.006>
- Singh J, Brar BS, Sekhon BS, Mavi MS, Singh G, Kaur G. 2016. Impact of long-term phosphorous fertilization on Olsen-P and grain yields in maize-wheat cropping sequence. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 106: 157-168.
- Soriano A, León RJC, Sala OE, Lavado RS, Deregibus VA, Cahuepé MA, Scaglia OA, Velázquez CA, Lemcoff JH. 1991. Río de la Plata grasslands. In: R. T. Coupland, ed. *Ecosystems of the world 8A. Natural grasslands. Introduction and western hemisphere*. Elsevier, New York. Pp 367-407.
- Spiertz JHJ. 2010. Nitrogen, sustainable agriculture and food security. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30: 43-55. <https://doi.org/10.1051/agro:2008064>
- Sucunza FA, Gutiérrez Boem FH, García FO, Boxler M, Rubio G. 2018. Long-term phosphorus fertilization of wheat, soybean and maize on Mollisols: Soil test trends, critical levels and balances. *European Journal of Agronomy* 96: 87-95.
- Tisdale SL, Reneau Jr RB, Platou JS. 1986. Atlas of sulfur deficiencies. *Sulfur in agriculture* 27: 295-322.
- Torres Duggan M, Melgar RJ, Rodríguez MB, Lavado RS, Ciampitti IA. 2012. Sulfur fertilization technology in the Argentine Pampas region: A review. *Agronomía y Ambiente* 32: 61-73.
- Van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance—a review. *Field Crops Research*, 143, 4-17.
- Manuel-Navarrete D, Gallopín GC, Blanco M. et al. Multi-causal and integrated assessment of sustainability: the case of agriculturization in the Argentine Pampas. *Environ Dev Sustain* 11, 621-638 (2009). <https://doi.org/10.1007/s10668-007-9133-0>
- Wyngaard N, Cabrera ML. 2015. Measuring and estimating sulfur mineralization potential in soils amended with poultry litter or inorganic fertilizer. *Biology and Fertility of Soils* 51: 545-552.
- Wyngaard N, Crespo C, Angelini H, Eyherabide M, Larrea G, Reussi Calvo N, Carciochi W, Sainz Rosas H. 2022. The effect of agriculture on topsoil carbon

- stocks is controlled by land use, climate, and soil properties in the Argentinean Pampas. CATENA 212: 106126.
- Zhang W, Xu M, Wang B, Wang X. 2009. Soil organic carbon, total nitrogen and grain yields under long-term fertilizations in the upland red soil of southern China. Nutrient cycling in agroecosystems 84: 59-69.
- Zhao RF, Chen XP, Zhang FS, Zhang H, Schroder J, Römheld V. 2006. Fertilization and Nitrogen Balance in a Wheat–Maize Rotation System in North China. Agronomy Journal 98: 938-945. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0157>
- Zubillaga MM, Conti ME. 1996. Availability of exchangeable and non-exchangeable K in Argentine soils with different mineralogy. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 159: 149-153.

Potasio en cultivos extensivos del litoral argentino#

Orcellet J. M.^{1*}, C. Quintero², E. Figueroa³, M. F. González Sanjuan⁴, F.O. García⁵

¹ EEA INTA Concepción del Uruguay, Argentina. ²FCA-UNER ³EEA INTA Mercedes ⁴ Fertilizar AC, ⁵Consultor y FCA (UNMdP). * EEA INTA Concepción del Uruguay, orcellet.juan@inta.gob.ar

Trabajo presentado a XXVIII Congreso Argentina de la Ciencia del Suelo. Buenos Aires, 15-18 noviembre de 2022. AACs-FAUBA-INTA

Resumen

Relevamientos recientes han evidenciado suelos con bajos niveles de K en la región este de Entre Ríos. Estas deficiencias pueden haberse acentuado debido a la elevada extracción sin reposición, como resultado de la intensificación agrícola en dicha región. Este trabajo presenta i) los resultados de ensayos y franjas experimentales realizados en Entre Ríos y sur de Corrientes y ii) la calibración preliminar del análisis de suelo de K intercambiable para predecir la probabilidad de respuesta a la fertilización potásica en cultivos predominantes en el área experimental. Durante las campañas agrícolas 2019/20, 2020/21 y 2021/22 se llevaron a cabo 31 ensayos y 16 franjas exploratorias en maíz, soja, trigo y arroz en el este, centro y oeste de Entre Ríos y el sur de Corrientes. Los niveles de K intercambiable (STK) promediaron 219 mg kg^{-1} , con un rango de 33 a 593 mg kg^{-1} , ubicándose el 50% de los datos centrales entre 103 y 343 mg kg^{-1} . La aplicación de K incrementó los rendimientos como tendencia general: +23% en maíz, +5% en soja, +8% en trigo y +7% en arroz. Sin embargo, estas respuestas fueron muy variables, registrándose respuestas significativas a K en 57%, 23%, 25% y 0% de los casos en los ensayos de maíz, soja, trigo y arroz, respectivamente; y en 50% de los casos de las franjas de maíz y trigo. La calibración preliminar del análisis de suelo de K intercambiable indica un rango de 145-204 mg K kg^{-1} por debajo del cual la probabilidad de respuesta a la fertilización potásica es alta. El análisis detallado de los metadatos asociados a esta red de ensayos y la evaluación de otros análisis de suelo y/o planta permitirán definir con mayor certidumbre las necesidades de K en los diferentes suelos y agroecosistemas de la región.

Palabras clave: soja, trigo, maíz, arroz, fertilización.

Introducción

El potasio (K) es uno de los tres macronutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. Los requerimientos de K de los cultivos son elevados y solo superados por los de nitrógeno (N). Muchas regiones del mundo presentan deficiencias de este nutriente y la producción de cultivos requiere de aplicaciones de fertilizantes y/o abonos potásicos (Dhillon et al., 2019). En Argentina, los suelos deficientes en K históricamente han incluido regiones de las provincias de Corrientes y Misiones y algunas zonas de Tucumán, pero en general en la región pampeana se presentan niveles elevados (Zubillaga y Conti, 1996; Morras y Cruzate, 2001). Sin embargo, relevamientos recientes han evidenciado suelos con bajos niveles de K en la región este de Entre Ríos (Sainz Rozas et al., 2019). Estas deficiencias pueden haberse acentuado debido a la elevada extracción sin reposición, como resultado de la intensificación de la agricultura en dicha región.

En Uruguay, se ha observado una situación similar en suelos agrícolas donde debido a la mayor remoción de K y nula reposición, se registraron deficiencias y respuestas a K a partir de fines de los 90s (Barbazán et al., 2011b; Majumdar et al., 2021). Investigaciones realizadas por diversas instituciones permitieron definir umbrales críticos de K intercambiable de 120-180 ppm por debajo de los cuales la respuesta a K es altamente probable en cultivos extensivos (Barbazán et al., 2011a), umbrales similares se han determinado por el cinturón maicero del centro de EE.UU. (Sawyer et al., 2002). El análisis de rutina empleado para determinar probabilidad de respuesta a K es la determinación del K intercambiable por extracción con acetato de amonio 1N pH 7 (Warncke y Brown, 1998).

A partir del relevamiento de Sainz Rozas et al. (2019), se planificó una red de ensayos y franjas de experimentación en distintas zonas de Entre Ríos y Corrientes con la finalidad de determinar

las áreas y cultivos con deficiencia, las respuestas a la fertilización y la posibilidad de calibrar análisis de suelos que permitan predecir la probabilidad de respuesta a K. Este trabajo presenta i) los resultados de ensayos y franjas experimentales realizados en Entre Ríos y sur de Corrientes y ii) la calibración preliminar del análisis de suelo de K intercambiable para predecir la probabilidad de respuesta a la fertilización potásica en cultivos predominantes en el área experimental.

Materiales y métodos

Durante las campañas agrícolas 2019/20, 2020/21 y 2021/22 se llevaron a cabo 31 ensayos y 16 franjas exploratorias en maíz, soja, trigo y arroz en el este, centro y oeste de Entre Ríos y el sur de Corrientes. Los ensayos y franjas se implantaron sobre suelos argiudoles típicos, verticos, rendolicos y acucos; hapludoles fluventicos; peludertes argicos, argiudolicos y acucos; ocracualfes verticos; y argiacuoles.

En los ensayos se evaluaron dosis de K de 0, 30, 60, 90 y/o 120 kg ha⁻¹ de K según cultivo. El diseño experimental fue en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones. Las franjas exploratorias consistieron en parcelas comerciales donde se incluyeron un testigo sin aplicación de K y una fertilización con 60-90 kg ha⁻¹ de K. En todos los casos, la fuente de K fue cloruro de K (50% K). En todos los tratamientos se aplicó N, fósforo y/o azufre según la situación de cada lote para evitar deficiencias de estos nutrientes.

Se realizaron análisis de suelo a la siembra de los cultivos con la finalidad de caracterizar cada sitio. El K intercambiable (STK) se determinó por extracción con acetato de amonio 1N a pH 7 (Warncke y Brown, 1998).

A madurez fisiológica de los cultivos se determinó el rendimiento mediante cosecha manual de 2 m² de cada parcela (ensayos) o cosecha mecánica de un área definida (franjas).

Los datos de rendimiento se analizaron mediante análisis de varianza y se utilizó la

prueba de la diferencia mínima significativa (ensayos) o la prueba t (franjas) para la comparación de medias entre tratamientos. La relación entre el STK y los rendimientos relativos de K (rendimiento testigo sin K/rendimiento máximo con aplicación de K) se evaluó mediante el método arco seno modificado propuesto por Correndo et al. (2017).

Las precipitaciones fueron variables entre sitios y años con rangos de 156-592, 292-761 y 174-537 mm durante los ciclos de maíz, soja y trigo, respectivamente. En algunos sitios, se registraron excesos hídricos, pero en general las tres campañas se caracterizaron por déficits hídricos durante el ciclo de los cultivos que afectaron los rendimientos y respuestas potenciales a la fertilización potásica.

Resultados y discusión

Los valores promedio para las diferentes determinaciones de suelo (Tabla 1) se ubican dentro de los rangos citados para la región (Sainz Rozas et al., 2019). La disponibilidad de K del suelo para los cultivos se caracteriza a través de los niveles de K intercambiable (STK), la saturación de K del complejo de intercambio (relación K intercambiable/CIC) y/o la relación de cationes (Ca+Mg)/K, con valores considerados críticos de 120-180 mg kg⁻¹, 2-5% y 7-11, respectivamente (Barbazán et al., 2014; Vázquez y Pagani, 2014). Los sitios de ensayo presentaron un amplio rango de condiciones para los dos primeros parámetros incluyendo condiciones inferiores y superiores a los niveles considerados críticos. Los niveles de STK promediaron 219 mg kg⁻¹, con un rango de 33 a 593 mg kg⁻¹, ubicándose el 50% de los datos centrales entre 103 y 343 mg kg⁻¹ (Figura 1). La saturación de K del complejo de intercambio (K intercambiable/CIC) promedió 2.4%, ubicándose el 50% de los datos centrales entre 1.45% y 3.7%. Por otra parte, la relación (Ca+Mg)/K promedió 49 (rango de 13 a 116), ubicándose en todos los casos muy por arriba del nivel crítico mencionado en la literatura.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos para las determinaciones de suelo (0-20 cm) previo a la siembra de los cultivos en los diferentes sitios experimentales. Ensayos y franjas 2019 a 2021.

Estadístico	pH	MO %	P Bray mg kg ⁻¹	CIC [#]	Ca	Mg	K	K	S-SO ₄ [*]	Zn ^{**}
				----- cmol kg ⁻¹ -----				----- mg kg ⁻¹ -----		
Promedio	6.4	2.8	10	21.2	16.4	2.6	0.5	219	6	0.7
DE	0.8	0.7	7	10.5	11.0	1.3	0.4	142	4	0.6
Mínimo	5.1	1.6	3	5.1	2.3	0.7	0.1	33	2	0.2
Máximo	8.1	4.4	33	43.7	41.5	4.5	1.5	593	22	3.0
Mediana	6.3	2.8	9	21.1	14.5	2.2	0.4	189	6	0.5
Q1	5.8	2.3	6	11.8	8.0	1.6	0.2	103	4	0.4
Q3	7.0	3.4	14	29.3	21.4	4.0	0.9	343	6	0.6

[#]Extracciones de capacidad de intercambio catiónico (CIC), Ca, Mg y K con acetato de amonio 1N a pH 7; ^{*}S-SO₄ por turbidimetría; ^{**}Extracciones de Zn con DTPA.

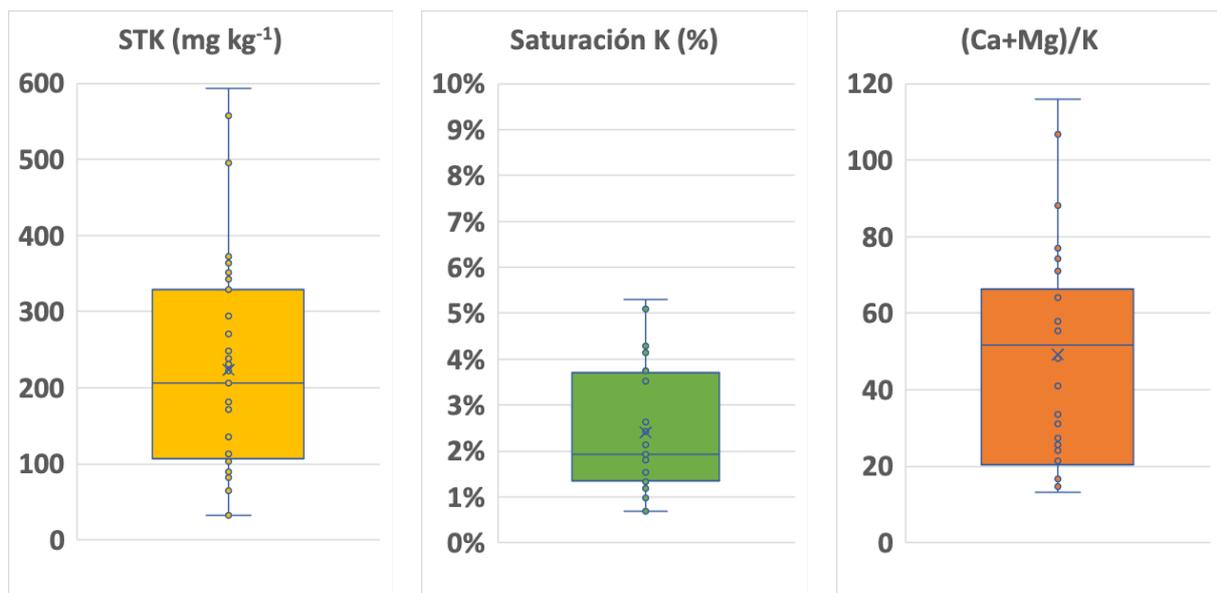


Figura 1. Niveles de STK, saturación de K y relación (Ca+Mg)/K en los 47 sitios de evaluación. Las barras verticales indican los percentiles 10% y 90%, las cajas los percentiles 25% y 75%, la línea horizontal la mediana, y el signo “x” indica la media.

Los rendimientos promedios de los cuatro cultivos se ubicaron en los niveles promedio de los buenos manejos de la región con marcada variabilidad entre sitios y campañas (Figura 2). La aplicación de K incrementó los rendimientos como tendencia general: +23% en maíz, +5% en soja, +8% en trigo y +7% en arroz. Sin embargo, estas respuestas fueron muy variables, registrándose respuestas significativas ($p < 0,10$) a K en 4 de los 7 ensayos de maíz (57%), 3 de los 13 ensayos de soja (23%), 2 de los 8 ensayos de

trigo (25%) y ninguno de los 3 ensayos de arroz (0%). Cinco de las 10 franjas exploratorias de maíz y 3 de las 6 franjas de trigo presentaron diferencias significativas debidas a la aplicación de K, 50% de los casos en ambos cultivos.

Con la información del rendimiento relativo (Rendimiento Testigo sin K/Rendimiento máximo con aplicación de K) y el valor de STK de los 47 ensayos y franjas, se ajustó una curva de calibración (Figura 3). Esta curva indicaría un rango crítico de STK de 145-204 mg kg⁻¹, por debajo del cual la probabilidad de respuesta a la

fertilización potásica sería superior al 10% del rendimiento. El rango crítico determinado es similar al indicado por investigaciones previas en

Uruguay (Barbazán et al., 2011a) y EE.UU. (Sawyer et al., 2002; Barbagelata y Mallarino, 2012).

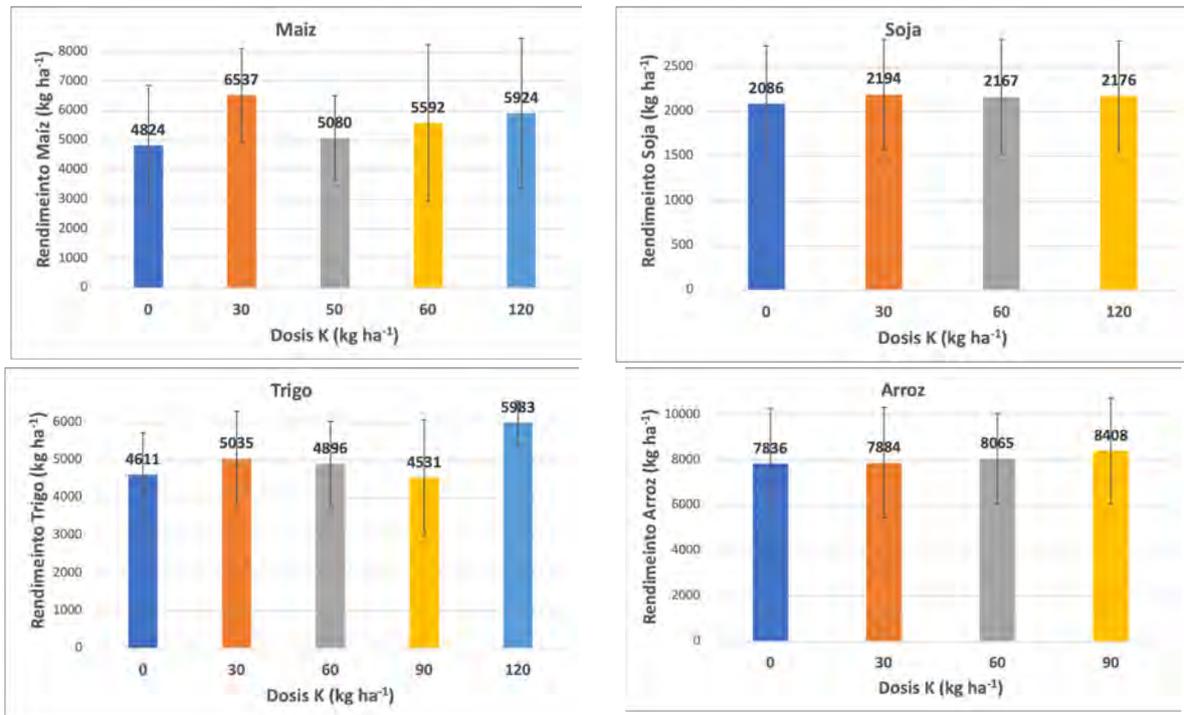


Figura 2. Rendimientos promedio de maíz, soja, trigo y arroz para los tratamientos con distintas dosis de K. Las barras verticales indican el desvío estándar. En maíz se promediaron 17 sitios para 0K, 7 para 30K, 6 para 50K, y 11 para 60K y 120 K; en soja 13 sitios para 0K, 30K y 60 K, y 11 para 120 K; en trigo 14 sitios para 0K y 60K, 8 para 30K, y 4 para 90K y 120K; y en arroz 3 sitios para todas las dosis.

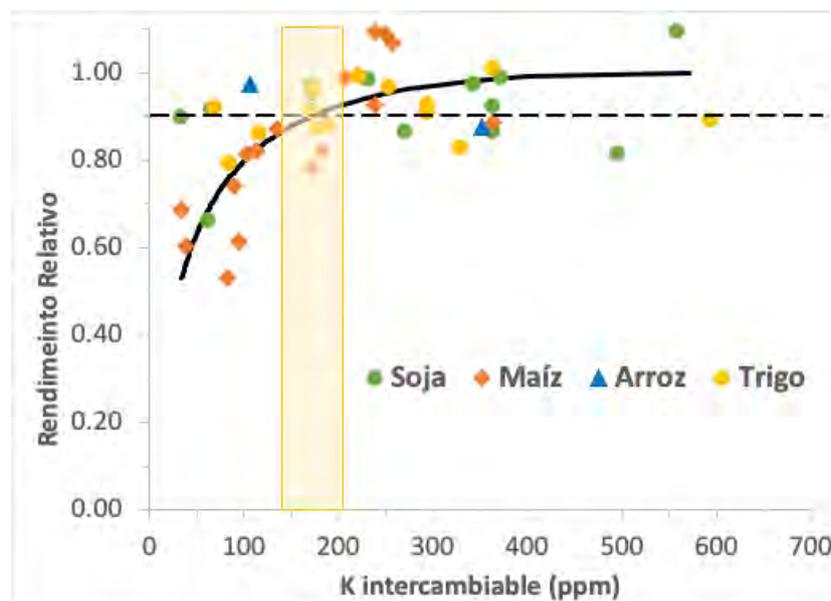


Figura 3. Relación entre el rendimiento relativo (Rendimiento Testigo sin K/Rendimiento máximo con aplicación de K) y el valor de STK de los 47 ensayos y franjas para los cultivos de maíz, trigo, soja y arroz. La curva de calibración (línea curva negra llena) se ajustó según el método del arco seno modificado (Correndo et al., 2017) (IC (90%) = 145-204 mg kg⁻¹; r = 0.55; n = 47). La franja amarilla vertical indica el rango crítico de STK de 145-204 mg K kg⁻¹, y la línea punteada horizontal indica un rendimiento relativo del 90%.

Conclusiones

Los resultados de ensayos y franjas experimentales realizados en Entre Ríos y sur de Corrientes confirman la deficiencia de K en cultivos extensivos en la región. La calibración preliminar del análisis de suelo de K intercambiable indica un rango de 145-204 mg K kg⁻¹ por debajo del cual la probabilidad de respuesta a la fertilización potásica es alta.

El análisis detallado de los metadatos asociados a esta red de ensayos y la evaluación de otros análisis de suelo y/o planta permitirán definir con mayor certidumbre las necesidades de K en los diferentes suelos y agroecosistemas de la región.

Agradecimientos

Los autores especialmente a todos los productores, asesores y personal de establecimientos donde se realizaron los ensayos. Esta red experimental fue financiada por Uralkali, Nitron y Fertilizar AC y el apoyo de las EEAs INTA Concepción del Uruguay y Mercedes y la Facultad de Ciencias Agropecuarias (UNER).

Bibliografía

- Barbagelata P. y A. Mallarino. 2012. Field correlation of potassium soil test methods based on dried and field-moist soil samples for corn and soybean. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77:318-327.
- Barbazán M.M., Bautés, C., Beux, L., Bordoli, Cano, J., J., Ernst, O., García, A., García, F., y Quincke, A. 2011a. Fertilización potásica en cultivos de secano sin laboreo en Uruguay: rendimiento según análisis de suelos. *Agrociencia Uruguay Vol. 15-2*: 93-99.
- Barbazán M., M. Conti y F. O. García. 2014. Potasio. En Echeverría H. E. y F.O. García (ed.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Ediciones INTA. 2a. Edición. Buenos Aires, Argentina. ISBN 9-789875-215658. p. 265-285.
- Barbazán M. M., A. del Pino; J. M. Bordoli; A. Calífrá; S. Mazzilli; y O. Ernst. 2011b. Situación de potasio en Uruguay: perspectivas de corto y largo plazo. En: II

- Simposio Nacional de Agricultura de Secano. v.: 1, p.: 21 – 33. Editorial: Hemisferio Sur, Montevideo.
- Correndo A. A., F. Salvagiotti, F. O. García, and F. Gutierrez Boem. 2017. A modification of the arcsine-log calibration curve for analysing soil test value-relative yield relationships. *Crop and Pasture Science*. Volume: 68; Issue: 3; <http://dx.doi.org/10.1071/CP16444>.
- Dhillon, J.S., Eickhoff, E.M., Mullen, R.W. y Raun, W.R. (2019), World Potassium Use Efficiency in Cereal Crops. *Agronomy Journal*, 111: 889-896. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.07.0462>
- Majumdar K., R. M. Norton, T. S. Murrell, F. O. García, S. Zingore, L. I. Prochnow, M. Pampolino, H. Boulal, S. Dutta, E. Francisco, M. S. Tan, P. He, V. K. Singh, y T. Oberthur. 2021. Assessing Potassium Mass Balances in Different Countries and Scales. In T. S. Murrell et al. (eds.), *Improving Potassium Recommendations for Agricultural Crops*, pp. 283-340. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59197-7_11
- Morrás, H y G Cruzate. 2001. Origen y distribución del potasio en suelos de la región Chaco-pampeana. *Actas Simposio "El Potasio en Sistemas Agrícolas Argentinos"*, 20-21 noviembre. FAUBA-Fertilizar INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Sainz Rozas, H; M Eyherabide; G Larrea; N Martínez Cuesta; H Angelini; N Reussi Calvo & N Wyngaard. 2019. Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana. En: *Simposio Fertilidad 2019. Fertilizar, Rosario, mayo 2019*.
- Sawyer J.E., A. Mallarino, R. Killorn y S. Barnhart. 2002. A general guide for crop nutrient and limestone recommendations in Iowa. PM 1688. University Extension. Iowa State University. Ames, Iowa, EE.UU.
- Vázquez, M y A Pagani. 2014. Calcio y Magnesio del suelo. En Echeverría H. E. y F.O. García (ed.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Ediciones INTA. 2a. Edición. Buenos Aires, Argentina. ISBN 9-789875-215658. p. 317-356.
- Warncke, D., y J.R. Brown. 1998. Potassium and other basic cations. En: J.L. Brown (ed). *Recommended chemical soil test procedures for the North Central region*. North Central Regional Publ. 221 (rev.). Missouri Exp. Stn. Publ. SB 1001. Univ. of Missouri, Columbia. p. 31-33.
- Zubillaga, M. M. y Conti, M. E. 1996. Availability of exchangeable and non-exchangeable K in Argentine soils with different mineralogy. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 159, 149-153. <https://doi.org/10.1002/jpln.1996.35815.90208>.

La realidad de la historia reciente del potasio en las condiciones agrícolas del Uruguay

Hoffman EM; Fassana N, Cortazzo N, Vega B, Vulliez A, Rovegno F, Van den Dorpel M, Akerman A, Leiva F, Sarli I, Viera JP, Gil L, Ferreira G².

2.- Equipo Técnico de Unicampo Uruguay

Los cambios y el recorrido tecnológico a nivel de producción en Uruguay desde fines del siglo XX, hasta fines de la primera década del siglo XXI, se caracterizaron por un profundo cambio del sistema de producción. Desde dejar de laborear, a abandonar el sistema de producción característico, dominado por cultivos de invierno en rotación con pasturas perennes, y establecer un sistema de agricultura continua en base a cultivos anuales con predominancia del cultivo de soja.

Tanto en los programas de investigación como en los de fertilización a nivel de producción, desde mediados del siglo XX se contemplaban básicamente al nitrógeno (N) y al Fósforo (P). El potasio (K) surgió recién a principios del siglo XXI (Barbazán et al., 2007, Bordoli et al., 2012; Barbazán et al., 2017). Los elevados niveles de K naturales de los suelos agrícolas del Uruguay, llevaron a un largo proceso de extracción sin

reposición. Junto con el cambio de la agricultura uruguaya, desde principios del 2000 surge la deficiencia de K como un nuevo problema emergente, resultado de la caída en los niveles de K en suelo en las tierras más ricas del litoral oeste, recostados contra el Río Uruguay.

La concentración de trabajos relacionados con la respuesta al K en suelos uruguayos bajo sistemas agrícolas y agrícola lecheros, desde inicios de los 2000, daban cuenta y evidencia de la necesidad de comenzar a considerar a la nutrición potásica a nivel de producción.

Cuando se iniciaba la segunda década del siglo XXI, y tecnológicamente se comenzaba a registrar un incremento sensible de chacras fertilizadas con K, un tercio de las chacras se ubicaban por debajo del nivel crítico de entonces – 0.34 meq de K 100 g suelo⁻¹ (equivalente a 133 mg kg suelo⁻¹) (Barbazan et al., 2011) (Figura 1).

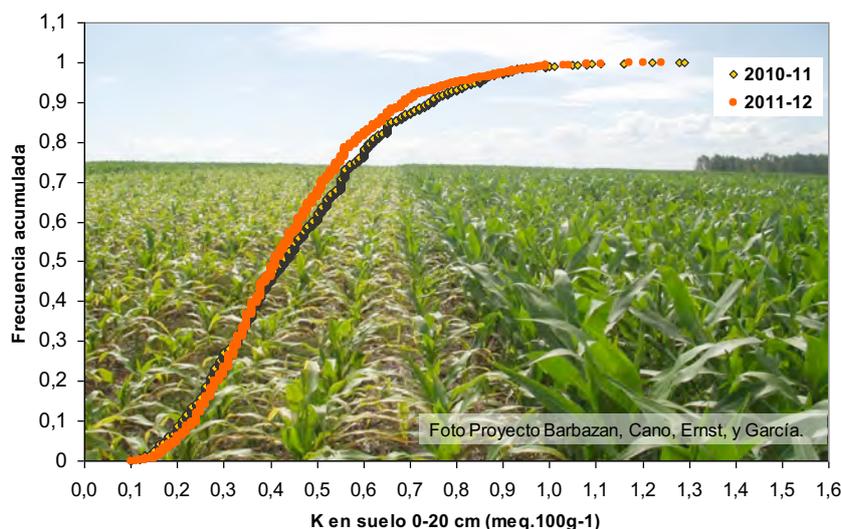


Figura 1.- Distribución de K en suelo, en dos safras de soja en Uruguay. Más de 170.000 has por safra, > 15 % de la superficie anual de soja. Base de datos de Unicampo Uruguay y Red Agrícola Uruguay (RAU Gis). Foto de fondo, experimento de respuesta al K en un cultivo de maíz en zona influencia de la ciudad de Young- Río Negro Uruguay.

Poco antes del máximo de área agrícola y de área de soja sembrada en Uruguay (2013-14), podemos decir que comenzaba definitivamente el ingreso de la agricultura uruguaya a la fase de fertilización potásica, y que la ubica actualmente

en más del 50% de las chacras fertilizadas por año.

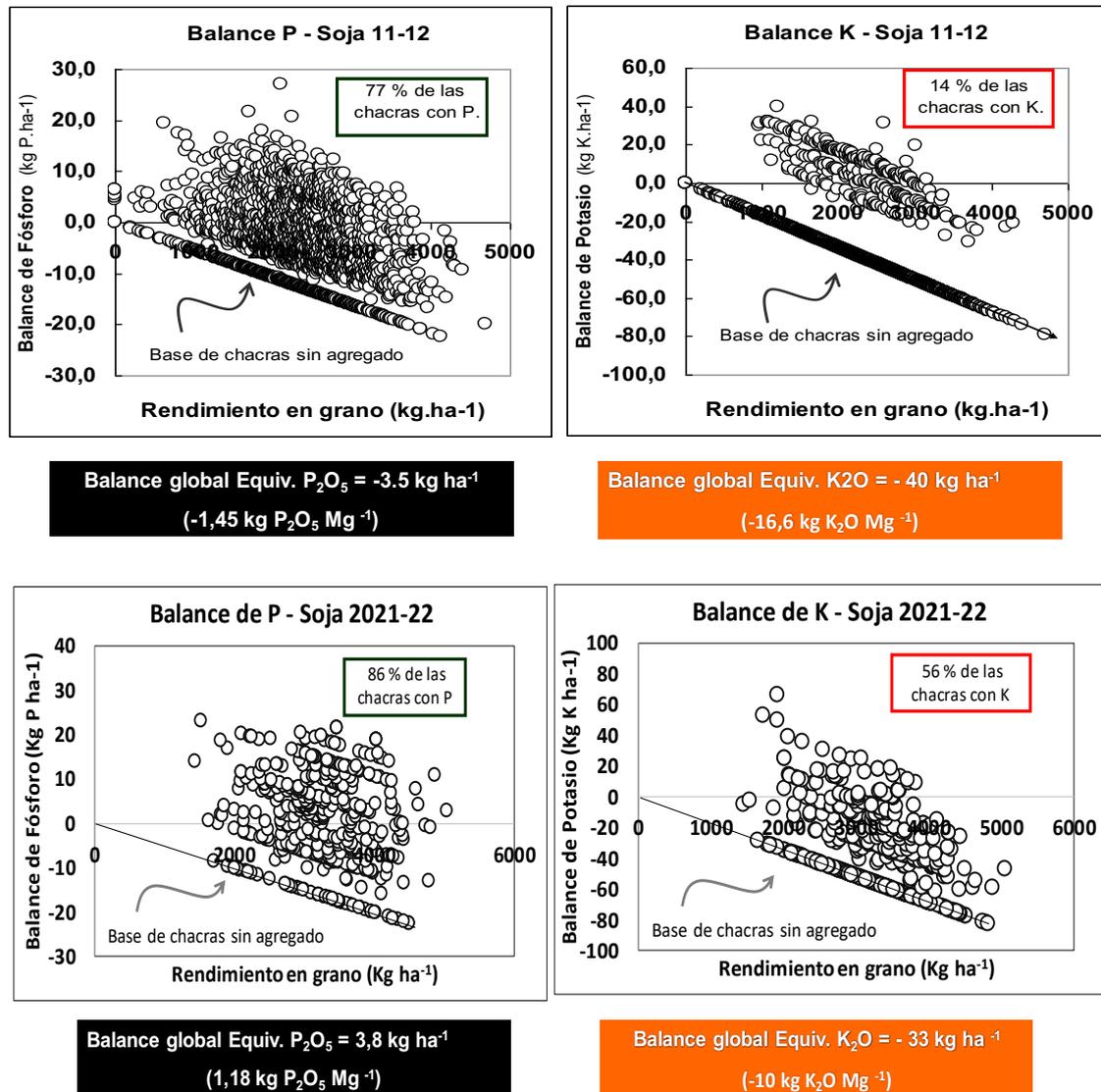


Figura 2.- Balance aparente de P y K en función del rendimiento de soja logrado chacra a chacra en dos zafras de soja, representantes de dos períodos en la historia de la, fertilización potásica en Uruguay. Zafra 11-12, 181.300 has, 12,5 % de la superficie anual de soja, zafra 21-22, 124.842 has, 11,8% de la superficie de soja en base a DIEA- MGAP 2022. Base de datos de Unicampo Uruguay y Red Agrícola Uruguay (RAU Gis).

En una zafra de productividad media (2420 kg ha^{-1}), hace 12 años atrás, con más de 3 de cada 4 chacras fertilizadas con P, y un balance aparente de P negativo, cercano a la neutralidad, observamos una situación contrastante para el K (Figura 2). Por ese entonces, se iniciaba la fertilización a nivel de chacra (1 de cada 7 chacras eran fertilizadas con K), y un resultado de balance aparente de K muy negativo.

Diez años después, los cambios en el P son menores, aunque se sigue con una muy elevada proporción de chacras fertilizadas y balance asociado al mantenimiento del P en el suelo. En el caso del K en este período, el cambio es significativo, más de un 50% de las chacras

fueron fertilizadas con K, persiste el balance negativo. En ambas zafras, la fertilización de los cultivos de invierno fue similar en proporción a los observado en soja (datos no mostrados), (en ambas zafras la intensidad de cultivos, cambiaba poco y oscilaba entre 1.5 y 1.6 cultivos por ha y por año).

En base a la información que surge de la RAU Gis, en este lapso de 10 años en la historia reciente de la agricultura uruguaya (Figura 2), es evidente el cambio en la fertilización potásica. Y si bien aún persiste un balance aparente negativo para el K, el de la zafra 21-22 también se mantiene elevado como consecuencia de que ésta

es una zafra de alta productividad media (3310 kg ha⁻¹).

Estimado el balance aparente de K, en términos de balance en kg de K₂O equivalente Mg grano soja⁻¹, este se reduce desde -16.6 a -10 kg

de K₂O equivalente por cada Mg de grano de soja cosechada (una reducción de 40% en el balance negativo). Si el rendimiento concretado en la zafra 21-22, hubiese sido como el de la zafra 11-12, el balance hubiese sido de -24 K₂O equivalente ha⁻¹.

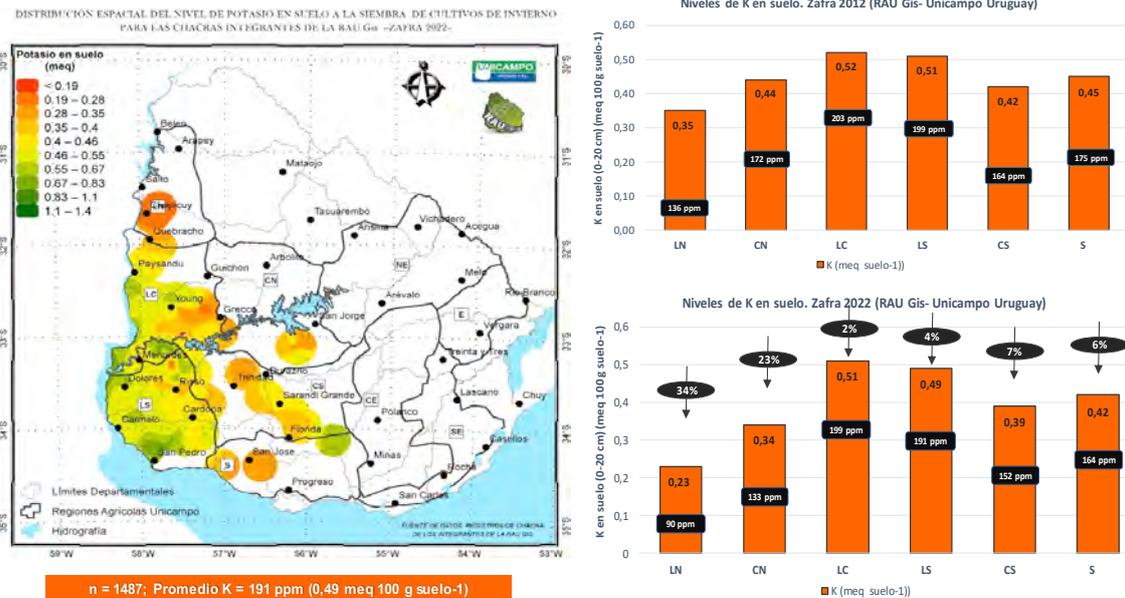


Figura 3.- Distribución GIS del K en suelo en la zafra 21-22 en las principales regiones agrícolas del Uruguay, y cambios en el contenido medio de K en suelo, entre la zafra 11-12 y 21-22. Base de datos de la RAU Gis – Unicampo Uruguay.

Si bien los niveles de K en suelo siguen bajando lentamente para las regiones más sembradas (litoral centro, litoral sur, centro-sur y sur), el valor medio de K en suelo para el área agrícola actual es mayor, consecuencia de que las regiones uruguayas con valores más bajos (LN, CN, E, NE y CE del país) hoy están nuevamente bajo esquemas pastoriles o con baja intensidad agrícola. En la zafra 11-12, el valor medio era de 0.41 meq de K 100 g de suelo⁻¹ (equivalente a 160 mg kg⁻¹), mientras que el valor medio del K en suelo a la siembra de la zafra de soja 21-22, se ubicó en 0.49 meq de K 100 g de suelo⁻¹ (equivalente a 191 mg kg⁻¹).

Entre esos dos momentos, la relación entre el Nc de K en suelo y la media de las chacras, casi no se altera, en la medida que el Nc se modificó también. El último ajuste en Uruguay posiciona el nivel por debajo del cual es altamente probable obtener respuesta al agregado de K, en 0.4 meq de K 100 g suelo⁻¹ (equivalente a 156 mg de K kg suelo⁻¹) (Barbazan et al., 2017).

Comentarios finales

El Uruguay se encuentra en una fase de fertilización importante con K, aunque por debajo del P, en donde más del 40 % de las chacras también se fertilizan con K en invierno y la intensidad de cultivos hoy es mayor a 1.5 cultivos por ha y por año. Sin embargo, el balance sigue siendo negativo, porque persisten cultivos sin fertilizar y aun en muchos de aquellos fertilizados (por las bajas dosis), el balance sigue siendo negativo. Al problema de las bajas dosis de K en una proporción importante de chacras, debemos sumar la elevada productividad y por tanto extracción de los cultivos en los últimos años en Uruguay. Adicionalmente en Uruguay el primer cultivo de invierno pasó a ser la colza canola, un cultivo de muy fuerte extracción de K.

Estamos, además, en una fase en la que observamos información experimental frecuente, que muestra respuesta al agregado de K en ambientes en donde no debería haberla, por darse en donde el K en suelo se encuentra encima de los niveles críticos actuales (NCs). Creemos

que la zona de K en suelo de alta incertidumbre en cuanto a la respuesta a la fertilización, se eleva por encima del NC actual hasta valores iguales o superiores a los 0.55 meq de K 100 g suelo⁻¹ (equivalente a 215 mg de K kg suelo⁻¹).

Por encima de NC, en donde observamos que crece la respuesta al K, probablemente este asociado a las relaciones con otros cationes del suelo, en ambientes que no rotan con pasturas y cuyos niveles de compactación son elevados.

Bibliografía

- Barbazan M; Bordoli M, Coitiño J, Del Pino A, Ernst O, Ferrando M, García F O, Hoffman EM, Mazzilli S, Rocha I. 2017. Fertilización potásica en cultivos agrícola en Uruguay. In Simposio Fertilidad 2017. Más allá de la cosecha. IPNI Cono Sur – Asoc. Fertilizar. Rosario Argentina. 138-141 p.
- Barbazan M, Bautes C, Beux I, Bordoli M, Cano JM, Ernst O, García FO, García A y Quincke A. 2011. Fertilización potásica en cultivos de secano sin laboreo en Uruguay. Agrociencia Uruguay. 15 (2): 93-99.
- Barbazan M, Ferrando M, Zamalvide J. 2007. Estado nutricional del lotus corniculatus en Uruguay. Agrociencia Uruguay. 11 (1). 22-34.
- Bordoli M, Barbazan M, Rocha I. 2012. Soil Nutritional survey for soybean production in Uruguay. Agrociencia Uruguay. Especial number. 76-83.
- Red Agrícola Uruguay. RAU GIS. 2022. Proyecto de cosecha de Información. Bien club creado y gestionado por Unicampo Uruguay. Activo del 2009 a la fecha.

Cosecha de datos y manejo en la agricultura digital: el nitrógeno como caso de estudio

Laila A. Puntel

Profesora de Agricultura de Precisión y Fertilidad, Universidad de Nebraska, EE.UU.

Para aprovechar al máximo las nuevas herramientas tecnológicas en la agricultura digital, los productores deberán poder cosechar los cultivos como también datos. Mucho ha cambiado desde que aparecieron los sistemas de posicionamiento global para uso del productor. Ahora, los productores pueden almacenar muchas capas de información de un solo campo, por año, por cultivo y muchas veces sin conocimiento de que la maquinaria lo está haciendo. Estas capas de información capturan la variabilidad en los parámetros medidos en el espacio y el tiempo. ¿Es esto un problema? ¿O una solución? Tenemos la tecnología para obtener los datos, pero ¿cómo convertimos la información en una toma de decisiones de manejo efectiva? ¿Cómo le mostramos al productor que esa decisión de manejo fue la adecuada?

El desarrollo de métricas y protocolos que evalúan la efectividad en el uso de datos y la ejecución de esas tecnologías son clave para promover la utilización de estas herramientas a gran escala y sostenida en el tiempo. Sin duda la agricultura digital conlleva en varios casos un incremento en la productividad, rentabilidad y eficiencia en el medio ambiente (Balafoutis et al. 2017; Klerkx et al. 2019). Pero sabemos que la adopción de estas herramientas, al igual que muchas tecnologías de precisión, es baja. Por lo contrario, en muchos casos la aplicación de nutrientes sitio-específica sigue basándose en simples enfoques empíricos.

Limitaciones para la adopción de tecnologías digitales

En sud-América las limitaciones más informadas para la adopción de tecnología de precisión y digitales fueron el costo de la tecnología, la falta de capacitación, el número limitado de empresas que prestan servicios y los beneficios poco claros (Puntel et al., 2022; Figura 1). Es de conocimiento que cuando agregamos valor a la tecnología se fomenta la adopción (Melchiori et al. 2018; Thompson et al. 2019;

Bolfe et al. 2020). Para mitigar algunas de estas limitaciones, nuestros hallazgos sugieren la necesidad de un plan de estudios educativo en agricultura digital que pueda satisfacer la demanda de habilidades laborales como el procesamiento, análisis e interpretación de datos. Se necesitan esfuerzos regionales para estandarizar estas métricas. Esto permitirá a las partes interesadas diseñar iniciativas específicas para promover la agricultura digital hacia la sostenibilidad de la producción de alimentos en la región.

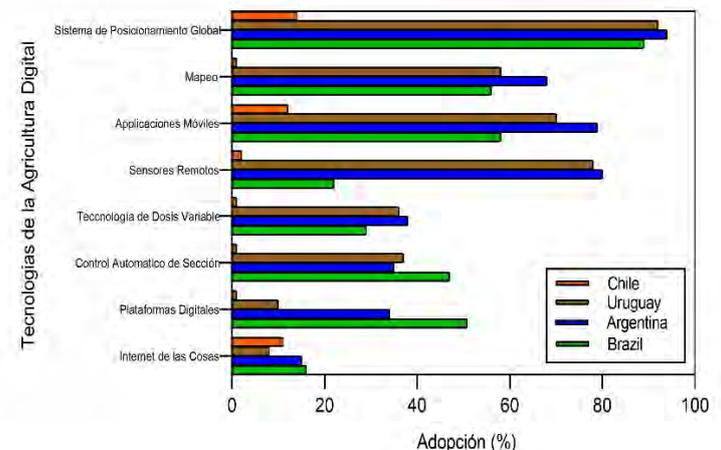


Figura 1. Porcentaje de adopción de tecnología agrícola digital (DA) para Argentina, Brasil, Chile y Uruguay. El porcentaje de adopción se indica en relación con las respuestas a cada encuesta. Adaptado Puntel et al., 2022

A lo largo de los años, los productores han logrado un progreso dramático en la capacidad de producir más de la misma unidad de tierra. Sin embargo, la agricultura digital puede ser una parte integral en la continuación de esa tendencia. Para lograr este impacto, tenemos que asegurar que los datos que se miden sean tan buenos como la forma en cómo traducir esos datos en información utilizando algoritmos, modelos, sensores etc., que sean robustos en un proceso mejorado de toma de decisiones.

Si usamos como ejemplo un lote en cual contamos con un pívot de riego y la oportunidad de aplicar nitrógeno con el agua de riego. El productor tiene la capacidad de ajustar el agua y nitrógeno a nivel del pico, lo que significa que en este caso el número de zonas de manejo es superior al que usualmente utilizamos. Ahora bien, tenemos la tecnología, pero no necesariamente la ciencia para traducir esta capacidad en una aplicación de agua y nitrógeno de alta resolución.

Método de evaluación de tecnologías para el manejo de nitrógeno

En un proyecto iniciado en el 2020, se trabajó con más de 80 productores de maíz y trigo de invierno para diseñar e implementar de manera económica ensayos aleatorios en franjas, para evaluar la efectividad de diferentes tecnologías para el manejo de nitrógeno en Nebraska, USA. Propusimos un marco conceptual y un procedimiento detallado para: seleccionar la tecnología de N a probar; diseñar e implementar ensayos de campo; generar, procesar y gestionar los datos de los ensayos de campo; y analizar automáticamente, informar y compartir los beneficios de la tecnología en N (Figura 2).

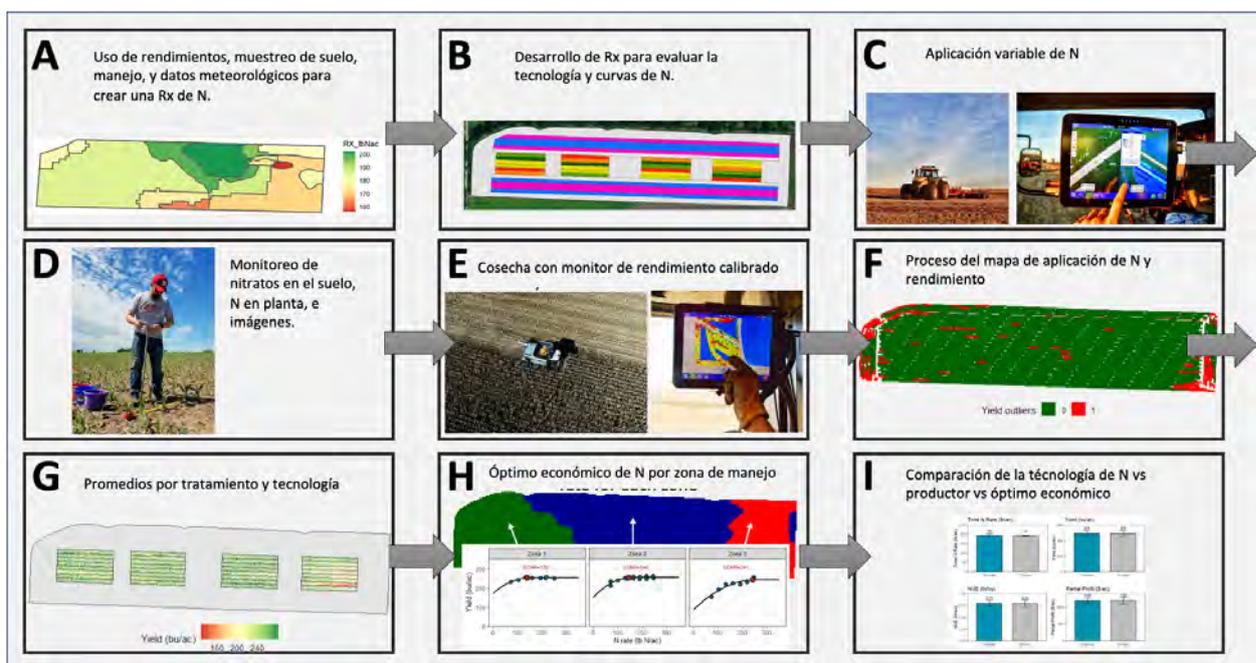


Figura 2. Diagrama de flujo para la implementación y evaluación de tecnologías para el manejo de nitrógeno: A) prescripciones nitrógeno creadas con la tecnología seleccionada, B) diseño del experimento combinada con las generaciones de curvas de rendimiento en respuesta al nitrógeno, C) aplicación del experimento durante la fertilización, D) recopilación de datos durante la estación de crecimiento, E) recopilación de datos al final de la temporada, F) procesamiento automático de datos, G) resúmenes de datos, H) análisis por zona, e I) intercambio de datos.

La selección de la tecnología N fue impulsada principalmente por los productores para garantizar un buen ajuste y aumentar la probabilidad de adopción futura de la tecnología. Llamamos al método de selección de tecnología, el "tier N approach", que consistió en seleccionar una tecnología que aumentara progresivamente el nivel de complejidad sin exceder el proceso de aprendizaje del productor. Clasificamos las herramientas N en: modelos de simulación de cultivos, sensores remotos, inhibidores y fertilizantes biológicos. Los ensayos en franjas

compararon el manejo tradicional de los productores y la tecnología de N seleccionada y se combinaron con bloques de N sitio-específicos colocados en áreas contrastantes de los lotes. Los datos de rendimiento de los bloques de N se utilizaron para derivar la tasa de N óptima específica del sitio. Cuantificamos los beneficios de las tecnologías actuales de N comparando su rendimiento, beneficio económico y eficiencia de uso de N (NUE) con el manejo tradicional de los productores y con la tasa de N óptima estimada específica del sitio para cada zona. La

comunicación de los resultados del ensayo a los productores fue crucial para garantizar la promoción y adopción de estas tecnologías de N.

Resultados preliminares mostraron, por ejemplo, que los rendimientos de las herramientas digitales de N basadas en modelos de cultivo aplicadas a nivel sitio-específico, varió campo por campo. Estos resultados demuestran la dificultad de estimar la dosis óptima y que, si bien las herramientas de N basadas en modelos de cultivos pueden tener éxito en campos individuales, no fueron consistentes en una variedad de manejos, suelos y condiciones climáticas en este estudio. Sin embargo, el 80% de los lotes evaluados con modelos de cultivos resultó en una mejora en la eficiencia del uso de N con respecto al productor.

Nuestro estudio sugirió que las entradas de datos, como las expectativas de rendimiento y la delimitación de las zonas de manejo, fueron factores importantes a considerar al usar herramientas de N basadas en modelos de cultivo. La implementación de este tipo de experimentos utilizando nuevas tecnologías digitales para el manejo de nutrientes es clave para apoyar la adopción, determinar qué datos son los necesarios a la hora de implementar cierta tecnología (modelos de cultivos, sensores, etc.), y generar mejoras futuras en estas herramientas.

Referencias

- Balafoutis A, Beck B, Fountas S, Vangeyte J, Wal TVd, Soto I, Gómez-Barbero M, Barnes A, Eory V (2017) Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics. *Sustainability* 9, 1339. doi:10.3390/su9081339
- Bolfe ÉL, Jorge LAdC, Sanches ID, Luchiari Júnior A, da Costa CC, Victoria DdC, Inamasu RY, Grego CR, Ferreira VR, Ramirez AR (2020) Precision and digital agriculture: adoption of technologies and perception of Brazilian farmers. *Agriculture* 10, 653. doi:10.3390/agriculture10120653
- Klerkx L, Jakku E, Labarthe P (2019) A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: new contributions and a future research agenda. *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences* 90–91,1–16. doi:10.1016/j.njas.2019.100315
- Melchiori RJM, Albarenque SM, Kemerer AC (2018) Evolucion y cambios en la adopción de la agricultura de precisión en Argentina. In '17° Curso de Agricultura de Precisión y Expo de Máquinas Precisas'. Mandredi, Argentina. pp. 7. (INTA: Mandredi, Argentina)
- Thompson NM, Bir C, Widmar DA, Mintert JR (2019) Farmer perceptions of precision agriculture technology benefits. *Journal of Agricultural and Applied Economics* 51, 142–163. doi:10.1017/aae.2018.27
- Puntel, Laila A., É. L. Bolfe, R. J. M. Melchiori, Rodrigo Ortega, Guadalupe Tiscornia, Alvaro Roel, Fernando Scaramuzza (2022) How digital is agriculture in a subset of countries from South America? Adoption and limitations. *Crop and Pasture Science*.

Nutrición en la agricultura digital: Hacia una agronomía más cuantitativa

Adrián Correndo, Carlos Hernández, Josefina Lacasa, e Ignacio Ciampitti.

Department of Agronomy, Kansas State University, Manhattan, KS, USA.

Resumen

Transitamos una época única en términos de oportunidades y desafíos para la agricultura. El nivel de acceso actual a la información no tiene precedentes.

Los paradigmas han ido evolucionando hacia una nueva concepción de la agronomía que no puede ni debe omitir la digitalización de los procesos. *Los datos son poder*, sosteníamos hace poco tiempo atrás. Desde hace un tiempo, sin embargo, ese paradigma ha evolucionado.

Si bien sabemos que la recolección de datos es fundamental y estratégica, fácilmente podemos encontrarnos naufragando en un mar de datos y conceptos aislados.

Definitivamente, con tener los datos no alcanza – hay que saber qué hacer con ellos. Incluso se debe tener cuidado de no dejar que los datos tomen decisiones por sí solos, sino basarse en ellos para la toma de decisiones.

De la mano de la agricultura digital, el rol del ingeniero agrónomo se está transformando. Además de definir objetivos claros y contar con una sólida formación en ciencia básica para una buena interpretación de los resultados, el profesional de la agronomía necesita más formación en ciencias de los datos.

Quienes inviertan en aprender a explorar, comprender y comunicarse con datos transformados en evidencia, marcarán una clara y sostenible diferencia. Aquí la ciencia juega un papel fundamental: tiene que guiarnos hacia

marcos de trabajo basados en la reproducibilidad y accesibilidad.

No obstante, la agronomía corre desde atrás comparada con otras áreas de la ciencia. Aunque la agricultura digital avanza a pasos agigantados, la educación y desarrollo en el análisis e interpretación de esos datos aún no acompañan el ritmo de avance en el proceso de colección de datos.

Necesitamos poner en contexto muchos conceptos nuevos: big-data, ingeniería de datos, machine learning, internet of things, blockchain, modelos de simulación, sensores remotos, APIs, estadística bayesiana, modelos jerárquicos, etcétera, etcétera.

El objetivo de esta ponencia es ir a las raíces de la cuestión y repasar, con ejemplos, algunas preguntas clave para no perderse al emprender en esta nueva era del análisis de los datos. Preguntas como: ¿Qué es un modelo?, ¿Queremos explicar o predecir?, ¿Qué datos necesitamos?, ¿Cuáles son las ventajas y limitaciones de un modelo respecto de otro?, ¿Cómo identificamos el mejor modelo?, ¿Qué pasa con las incertidumbres del modelo?, ¿Cómo armamos un análisis reproducible?, ¿Cómo hacemos nuestros resultados más accesibles? ¿Cómo nos movemos más rápido del dato a la toma de decisión?

Movernos desde una agronomía tradicional hacia una más cuantitativa, sin comprar “espejos de colores” ni mirar desde afuera, depende de cómo los equipos de trabajo se eduquen, formulen y busquen respuestas a estos interrogantes.

Nutrición Digital Bajada al Suelo

Tourn, Santiago^{1y2} – Pedro Platz^{1y2} – Emiliano Ladreche² – Heber Raggio² – Camila Martinez² – Santiago Bazterrica² – Nicole Cabellier².

¹Facultad de Ciencias Agrarias, UNMdP, ²MecaTech

La nutrición es cada vez más inteligente y digital, ciencia de datos, internet de las cosas, algoritmos, inteligencia artificial y otras tantas virtudes colaboran con la generación de mapas de prescripción sitio específico muy ajustados. Una vez generado el archivo comprimido que contiene la dosis y la ubicación exacta dónde colocar el fertilizante, comienza la menos avanzadas de las acciones, el “envío de la prescripción a la máquina”.

En esta etapa es dónde pueden ocurrir grandes ineficiencias operativas ya que la conducción de la información nube-máquina todavía pende del hilo más delgado que es la conectividad de señal GPRS, EDGE, 3G, 4G y 5G de cada zona. Si bien este feedback de datos está ocurriendo (Tabla 1), son pocos los desarrollos especializados en este tema y podría avanzar más rápido una vez que la conectividad en el territorio productivo argentino se expanda y estabilice (Figura 1). Asimismo, es incipiente del desarrollo de tecnologías que permiten conectar cualquier controlador de una máquina con una plataforma digital y así generar el feedback de información.

Algunas empresas lo tienen en parte desarrollado, pero sólo para equipos o máquinas de su marca comercial, es así, que surge la necesidad de poder encontrar integraciones entre empresas tecnológicas y de maquinarias para que el productor pueda conectar todas sus máquinas a la nube, independientemente de la marca o modelo. En la situación ideal debería existir la generación inteligente de prescripciones de fertilización, su envío a la máquina sin interrupciones, la ejecución de la prescripción de manera precisa y la devolución de un mapa de aplicación real. En todos estos puntos hay “cuellos de botella” que son más o menos difíciles de solucionar.

Tabla 1. Proporción de soluciones digitales para el agro en Argentina. Fuente INTA/ MecaTech

Plataforma	Solución	Proporción
Apps de celular	Calibración, gestión de siembra, fertilización, pulverización, clima, mercados	60%
Web de gestión de la producción agropecuaria	Logística de insumos, labores, ambientaciones, prescripciones, etc.	35%
Gestión de maquinarias	Conectividad de maquinarias, seguimiento, mantenimiento, envío de prescripciones, recepción de mapas de aplicación	5% (80% sin integración)

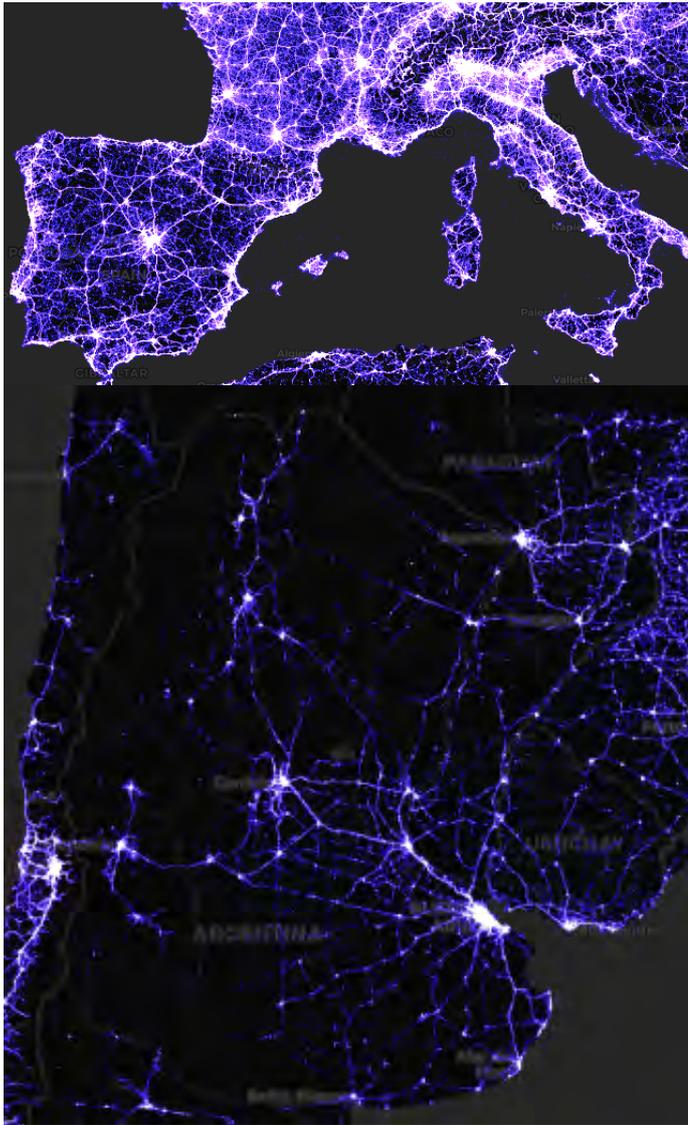


Figura 1. Mapa de cobertura de redes GRPS, EDGE, 3G, 4G y 5G (Fuente: NPERF)

La conectividad y sus avances nos sorprenden a todos, los límites parecen infinitos, concentramos nuestra energía y atención sobre ello y nos estamos olvidando que la definición final no lo hace la conectividad, sino una máquina fertilizadora que, hasta hoy, es operada por humanos. No se debe perder el foco de esto, los lineamientos básicos de configuración de un equipo y su mantenimiento y la operación del equipo van a definir si realmente lo que se prescribió está ocurriendo con precisión y exactitud. Una dosis precisa en el lugar indicado serían los objetivos de cualquier fertilizadora, sin embargo, existen tantas variantes en carga tecnológica de equipos, calidad de fertilizante y capacitación del operario, que pocas veces se puede ser realmente eficientes. No obstante, en los últimos dos años se han mejorado mucho las tecnologías de aplicación en Argentina, sobre

todo la fertilización proyectada por discos y por aire y difusores (Figura 2) que aplican el 60% del fertilizante nitrogenado (Figura 3) y azufrado y el 40% del fertilizante fosforado.

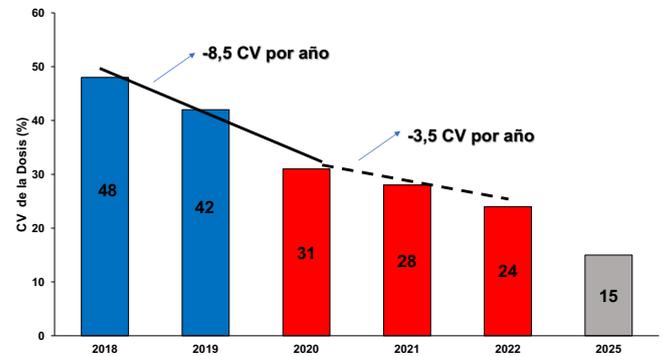


Figura 2. Evolución de la calidad de aplicación de fertilizante sólido por proyección en Argentina. Fuente propia, 250 fertilizadoras.

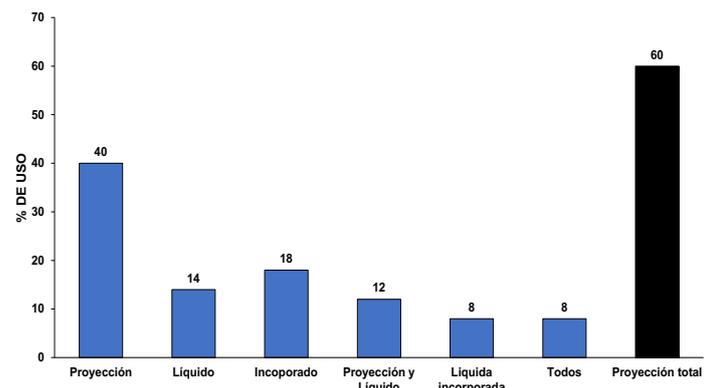


Figura 3. Uso de las tecnologías de aplicación de fertilizante nitrogenado en Argentina. Fuente propia. 318 encuestados.

La generación de una ambientación con las nuevas tecnologías digitales puede demorar segundos, luego deben ajustarse dosis de fertilizantes a los ambientes que queremos diferenciar, se realiza la prescripción y está lista para enviar a la fertilizadora. Si la prescripción es para una máquina de discos o neumática, se debe tener en cuenta que este tipo de equipos tienen generalmente un gran ancho de labor y no diferencia dosis por secciones (actualmente), así, cuando se generan los polígonos, debe considerarse que tengan el tamaño acorde al pixel de dosis que hace la fertilizadora. Como ejemplo, una fertilizadora de 30 m de ancho de labor a 20 km/h recorre una hectárea en aproximadamente 45 segundos y tarda entre 8 y 10 segundos en cambiar la dosis (Figura 4), por lo tanto, la generación de polígonos pequeños o

pueden pasarse por alto o bien que se aplique la dosis indicada en el polígono, pero un pixel real más grande. La sumatoria de todas estas variables además de la variabilidad en la

distribución de la dosis puede resultar en una respuesta menor a la esperada, atentando contra la importancia de la dosis sitio específico en lotes con variabilidad.

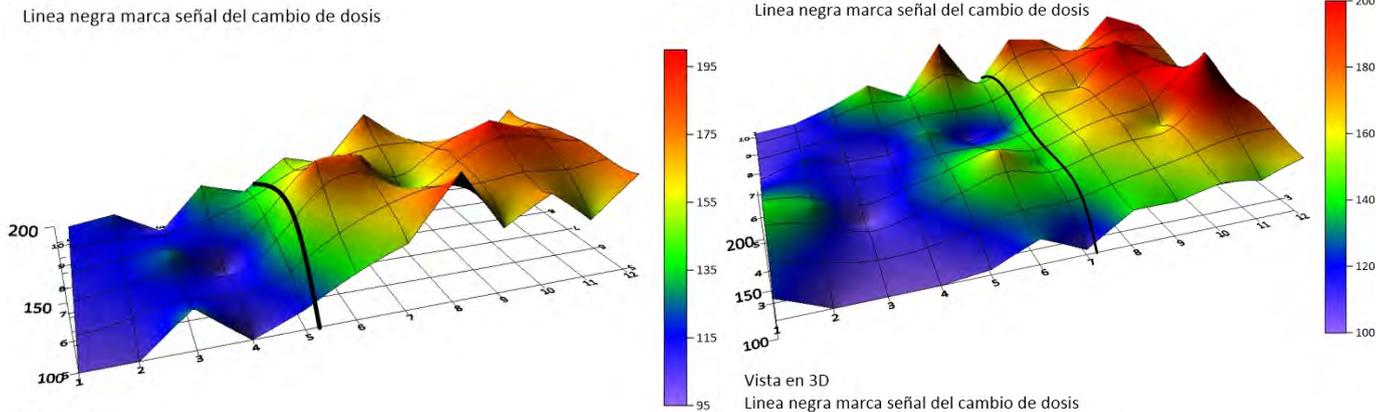


Figura 4. Cambio de dosis en máquina neumática arriba y de discos abajo luego de cruzar ambientes con diferentes niveles de fertilizante (de 100 a 200 kg/ha). Fuente Propia.

En resumen

La gestión y procesamiento de datos en la gestión de la fertilización en Argentina ha evolucionado enormemente, sin embargo, hay más variables que se deben controlar para que el resultado productivo, económico y ambiental esté a favor del uso de estas tecnologías. Algunas de estas variables son:

1. Ampliar la cobertura de las redes GPRS, EDGE, 3G, 4G y 5G de todas las compañías prestadoras de servicio.
2. Generar prescripciones de fertilización acordes a los anchos de labor y velocidades de trabajo de las fertilizadoras más utilizadas (discos y neumáticas)
3. Generación de más integraciones entre empresas que conectan maquinarias con otras de gestión de la producción agropecuaria y/o promover plataformas que permitan hacer la gestión de la producción agropecuaria y además conectar cualquier máquina independientemente del tipo y marca de máquina y del tipo de controlador. Promover la utilización de protocolos ISOBUS.
4. Ajustar en las fertilizadoras las dosis y su distribución con mayor frecuencia, ya que es el eslabón final de la cadena tecnológica de la fertilización y quien define en gran parte el éxito del plan de fertilización.

Aplicaciones y perspectivas del uso de Bioestimulantes y Biorreguladores en agricultura

Antonio Luiz Fancelli

Ing. Agr. MSc, Dr., Consultor y CEO de Fancelli & Asociados – Consultoría Agronómica y ex-Profesor del Departamento de Producción Vegetal de la Escuela Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Universidad de São Paulo
fancelli@usp.br

Introducción

Independientemente de la tecnología empleada, el ambiente de producción al que se somete la planta constituye un condicionante preponderante del rendimiento y la productividad. La fotosíntesis, la respiración y la transpiración son funciones directas de la energía disponible en el ambiente, mientras que el crecimiento, desarrollo y translocación de los fotoasimilados dependen de la disponibilidad de agua y nutrientes, siendo sus efectos más intensos en condiciones de temperaturas óptimas y ausencia de restricción lumínica. Sin embargo, se enfatiza que todos estos procesos fundamentales en la vida vegetal están coordinados por acciones hormonales.

En este contexto, el uso de biorreguladores y/o bioestimulantes es de suma importancia para restablecer el equilibrio hormonal; para desencadenar acciones específicas; para la adaptación de las plantas a condiciones de estrés; fortalecer sus mecanismos de defensa y asegurar una relación equilibrada entre las fases vegetativa y reproductiva, que culmine en una mayor producción y sostenibilidad agrícola.

Definiciones y conceptos

Las **hormonas vegetales** son compuestos orgánicos, no nutrientes, derivados de síntesis

endógena que, en pequeñas cantidades (10^{-4} a 10^{-6} M), promueven, inhiben o modifican procesos morfológicos y fisiológicos en las plantas. Los reguladores más conocidos pertenecen a los grupos de Auxinas (AX), Giberelinas (GA), Citoquininas (CK), Etileno (ET), Ácido Abscísico (ABA), Brasinoesteroides (BR), Jasmonatos (JA) y Salicilatos (SA) (Tabla 1).

Los **biorreguladores**, sin embargo, son sustancias exógenas sintéticas o naturales que, cuando se aplican a las plantas, tienen acciones similares a las hormonas vegetales. Asimismo, los **Biorreguladores** o **Bioestimulantes** pueden estar asociados a dos o más grupos de sustancias hormonales exógenas o mezclados con sustancias de otra naturaleza como poliaminas, aminoácidos, proteínas, nutrientes, entre otros. También dentro de esta clase de productos se pueden encontrar y clasificar los **Bioactivadores**, que están compuestos por moléculas químicamente activas capaces de ejercer efectos similares a los de los biorreguladores (extractos vegetales, aldicarb, tiametoxam, imidacloprid, cianamida hidrogenada, triazoles específicos, estrobilurinas diversas y otros), al alterar o inducir la síntesis de hormonas endógenas y otros metabolitos activos que interfieren con el desarrollo y el metabolismo de las plantas.

Tabla 1. Principales grupos de hormonas y reguladores vegetales.

Grupos	Endógeno	Sintético
Auxinas	Ácido Indolacético (AIA)	Ácido Indolbutírico (IBA), Ácido Naftaleno Acético (NAA) 2,4-D
Giberelinas	Ácido Giberélico (GA)	-
Citocininas	Zeatina	Cinetina Benziladenina (6-BA), Benzilaminopurina (BAP)
Retardadores	-	Chlormequat (CCC), Daminozide (SADH) Paclobutrazol (PBZ) Ácido 2,3,5-Triiodobenzoico (TIBA)
Inhibidores	Ácido Abscísico (ABA)	Hidrazida Maleica (MH)
Etileno	Etileno (C ₂ H ₄)	Ethephon

Principales sustancias hormonales y sus principales acciones en la vida vegetal

Entre las principales sustancias hormonales utilizadas en la agricultura se destacan las **Auxinas**, **Citoquininas**, **Giberelinas**, **Ácido Abscísico** y **Etileno**.

Las **auxinas**, (del griego “auxein” que significa crecer), tienen como principal representante natural el Ácido Indol Acético (AIA), que tiene una amplia presencia en las plantas y se produce predominantemente en órganos con crecimiento activo, como las partes apicales de los meristemas de la parte aérea (ápice caulinar), en hojas jóvenes y en frutos en desarrollo. El AIA presenta el triptófano como precursor y el zinc como precursor del triptófano. El AIA presenta movimiento basípeto (desde el ápice hasta la base de la planta) y sus principales funciones están relacionadas con: a) Elongación celular en células jóvenes (desarrollo vegetal); b) División celular (sinergismo con citoquininas); c) Mantenimiento de la dominancia apical; d) Iniciación de raíces y crecimiento de raíces; e) Diferenciación y mantenimiento de tejidos vasculares (xilema y floema); f) Curación de heridas; g) Retraso de la senescencia de las hojas; h) Regulación del desarrollo de frutos; i) Reducción de la abscisión de estructuras reproductivas; j) Partición de fotoasimilados y k)

Inducción de movimientos vegetales (nastismos, tropismos y tigmotropismos).

Las **giberelinas** se encuentran en hojas jóvenes, yemas activas y en los entrenudos de los brotes. Sin embargo, las semillas y frutos en desarrollo también pueden mostrar altos niveles de estas hormonas, con la excepción de las semillas maduras. La síntesis de giberelinas activas, principalmente GA₁, GA₃ y GA₄, son promovidas por factores ambientales, como las bajas temperaturas (frío) y los días largos. Las giberelinas también se pueden obtener de colonias de hongos específicos, como *Gibberella fujikuroi*. Actualmente, hay 136 giberelinas conocidas, pero la mayoría están inactivas. La **giberelina** se puede transportar a través del xilema y el floema, según su demanda. Sus principales funciones son: a) Aceleración de la germinación de semillas (producción de enzimas digestivas); b) Promoción de la expansión y crecimiento celular; c) Contribución a la división celular; d) Elongación del Tallo; e) Aumento en el número de entrenudos y diámetro del tallo; f) Aumento del tamaño del fruto; g) Reducción de abscisión de órganos reproductivos; g) Retrasar la degradación de la clorofila y h) Ayudar a romper la latencia de las yemas.

Las **citoquininas** se pueden encontrar en forma libre, y los meristemas apicales de las raíces son los sitios principales de síntesis de

estas hormonas. Sin embargo, también se pueden encontrar en hojas jóvenes y en semillas en desarrollo. La **citoquinina**, al ser un compuesto nitrogenado, tiene como precursor la adenina o, más concretamente, nucleótidos e isopentenilpirofosfato o isopenteniltransferasa (IPT). Su transporte puede ocurrir vía xilema y floema. Sus principales funciones son: a) División y diferenciación celular (equilibrio con Auxina); b) Ruptura de la dominancia apical; c) Inducción del crecimiento de yemas axilares (ramificaciones o brotes laterales); d) Desarrollo y protección de cloroplastos; e) Síntesis de clorofila; f) Aumento de la actividad de las enzimas que incorporan CO₂; g) Establecimiento y aumento de drenes; h) Coordinación de la relación fuente-sumidero y i) Retraso de la senescencia de la hoja (aumento de la duración de la hoja).

El **ABA**, ácido abscísico, erróneamente asociado con la abscisión, está ampliamente distribuido en las plantas vasculares, encontrándose en todos los órganos y tejidos vivos, desde la cofia de la raíz hasta la yema apical de la parte aérea. El **AIA** se sintetiza en casi todas las células que poseen cloroplastos o amiloplastos y presenta como precursor un producto intermedio de la biosíntesis de las xantofilas, encontrándose en forma libre o conjugado con monosacáridos. El transporte de **ABA** puede ocurrir tanto a través del xilema como del floema; sin embargo, dicha hormona suele ser más abundante en el floema. Sus principales funciones son: a) Control de pérdidas de agua por parte de las plantas; b) Monitoreo de apertura y cierre de estomas; c) Control de Conductividad Hidráulica y Flujo Iónico de la planta; d) Desarrollo de semillas; e) Producción de Proteínas LEA (proteína protectora de embriones); f) Latencia de semillas; g) Crecimiento de raíces y brotes; h) Senescencia de hojas y i) Dormancia de yemas.

El **etileno** es una molécula simple, inflamable y fácilmente oxidable. El **etileno**, en su forma volátil, se libera del tejido que lo produce, difundiéndose por los espacios intercelulares,

puediendo sensibilizar rápidamente los diferentes órganos de la planta. El etileno puede ser producido por casi todos los tejidos de las plantas superiores (principalmente en las regiones meristemática y nodal), dependiendo de la condición a la que se someta la planta. El precursor del etileno es la metionina y el ácido aminociclopropano carboxílico (ACC) que es regulado por otras hormonas (principalmente la citoquinina) y por condiciones de estrés. Sus principales funciones son: a) Epinastia de las Hojas; b) Ayuda en la germinación de semillas; b) Estimulación del florecimiento; c) Senescencia de Hojas y Flores; d) Abscisión de Hojas, Flores y Frutos y e) Maduración de Frutos (principalmente climatéricos).

Requisitos para una acción hormonal efectiva

La respuesta de la planta a las hormonas (reguladores del crecimiento) implica los siguientes requisitos:

- a. las hormonas deben estar presentes o llegar a las células objetivo, en el momento adecuado y en cantidades mínimas suficientes para una adecuada sensibilización;
- b. las hormonas deben ser efectivamente reconocidas y captadas por las diferentes estructuras vegetales especializadas o por grupos de células que responden a ellas (proteínas receptoras ubicadas en la membrana plasmática);
- c. Las señales deben ser identificadas, amplificadas e interpretadas (con la ayuda de señales secundarias) desencadenando la respuesta fisiológica efectiva al mensaje original emitido por la hormona (promoción, inhibición, expresión génica y/o alteraciones metabólicas).

Aun así, algunos investigadores reportan que las respuestas hormonales efectivas se ven favorecidas por el suministro adecuado de calcio, boro y fósforo presentes en las plantas, ya que constituyen importantes señales secundarias.

Cuidados y uso de biorreguladores en la agricultura

Aunque a menudo se discute la acción de las hormonas aisladas, no se pueden descuidar las interrelaciones entre estas sustancias, ya que en algunas situaciones es imprescindible combinar muchas señales para lograr sus efectos, como ocurre con la sinergia entre Auxina-Citoquinina y Giberelina-Auxina. Además, una hormona puede influir en la biosíntesis de otra, de modo que los efectos producidos por una de ellas pueden, de hecho, ser modulados por otras. Como ejemplo, se puede mencionar el hecho de que altas dosis de auxina inducen la biosíntesis de etileno; que la giberelina puede inducir la síntesis de auxina y viceversa, así como la citoquinina puede reducir la producción de etileno por parte de la planta.

Tales hallazgos confirman la importancia de mantener el equilibrio hormonal, que puede verse alterado por intervenciones o mal uso. Por tanto, la probabilidad de aparición de problemas será menor cuando se utilicen productos relacionados con precursores hormonales o compuestos por dos o más biorreguladores debidamente balanceados, en cantidades adecuadas y en estados fenológicos específicos. Así, la aplicación individualizada de las sustancias hormonales requiere conocimiento y criterio redoblado, para evitar el desequilibrio y los efectos negativos derivados de su uso incorrecto.

En Brasil, los biorreguladores compuestos por sustancias hormonales sintéticas, precursores o extractos de algas, están siendo ampliamente utilizados en soja, maíz, trigo, algodón, caña de azúcar e innumerables cultivos de hortalizas y frutas, principalmente manzanas y uvas, resultando en efectos positivos y económicamente viables.

Por mencionar algunos ejemplos, el uso de biorreguladores con énfasis en la **citoquinina** ha resultado en una mejora significativa en la arquitectura de las plantas de soja,

contribuyendo a un aumento en el número y rigidez de las ramas laterales (ruptura de la dominancia apical); para reducir la tasa de crecimiento de la planta (crecimiento armonioso) y para construir plantas más erguidas (mejor relación de equilibrio entre la raíz y la parte aérea). Estos efectos pueden favorecer el aprovechamiento de la luz por el tercio inferior de la canopia permitiendo el mantenimiento de un mayor número de vainas en la parte inferior de la planta, y también pueden promover el aumento de la vida útil de los nódulos y una mayor penetración de pesticidas en el cultivo en las etapas reproductivas finales, culminando en una mayor productividad. Por lo tanto, se recomienda el uso de dosis mayores de **Citoquininas** en las hojas, preferentemente acompañadas de dosis menores de auxinas y giberelinas, en los estados fenológicos V5/V6 y R2/R3, asociado al aporte de magnesio foliar en cada aplicación.

Además, el uso de bioestimulantes o biorreguladores que contengan **citoquininas** puede resultar en la mayor tasa de llenado de granos en todos los cultivos de granos. Así, aplicados en cultivos de soja, entre los estadios R5.1 y R5.3, podrán asegurar una mayor duración del área foliar, una mayor vida útil de Rubisco y una mejora en la removilización de nutrientes de diferentes partes de la planta; además de contribuir al aumento de demanda de los destinos, generando ganancias significativas en la productividad, ya que, en esta etapa de la vida de la planta, la concentración de citoquinina natural es muy baja o nula.

Aun así, en Brasil, debido al cultivo de extensas áreas de soja, principalmente en el estado de Mato Grosso, predomina la fertilización al voleo (P, N y K), con el objetivo de aumentar el rendimiento operacional, lo que puede perjudicar el desarrollo inicial de las raíces. Así, con el objetivo de mitigar el problema mencionado, se ha utilizado la aplicación foliar de productos con mayor concentración de Auxinas, preferentemente asociadas a fósforo y nitrógeno, en los estados fenológicos iniciales

(hasta V4), cuya recomendación ha contribuido al restablecimiento del rápido estímulo del crecimiento de las raíces

En poroto (feijão), numerosos trabajos demuestran que el uso de bioestimulantes o biorreguladores, en el tratamiento de semillas y brotes, redundan en múltiples beneficios para esta especie, que se caracteriza por una alta sensibilidad al estrés. Por lo tanto, el uso de productos que contienen auxina, citoquinina y giberelina, en el tratamiento de semillas, proporcionó mayor velocidad de emergencia, menor tasa de plántulas anormales, mayor velocidad en el crecimiento de las raíces, así como mayor tolerancia a los hongos del suelo, principalmente del género *Fusarium*. Asimismo, el uso de bioestimulantes, vía foliar, en las etapas reproductivas iniciales (botones florales), contribuyó a una mayor tolerancia a la sequía, mayor tasa de ramificación, menor tasa de aborto de flores y vainas y mayor densidad de grano.

Con respecto a la caña de azúcar, el uso de biorreguladores, ahora con énfasis en la **Giberelina**, ha contribuido a aumentar la productividad del cultivo y también a la producción de azúcar (sacarosa), debido a la acción de estas hormonas en el largo de entrenudos y diámetro del tallo, aumentando la capacidad cúbica de almacenamiento de fotoasimilados de la planta. En este contexto, este efecto también puede ser beneficioso para el cultivo de maíz, asegurando un mejor desarrollo del tallo, lo que puede favorecer la acumulación de una mayor cantidad de reservas para ser utilizadas por la planta, en situaciones de emergencia, como la relacionada con la baja disponibilidad de agua al final del ciclo del cultivo (baja tasa fotosintética), durante la etapa de llenado del grano.

En el cultivo de uva de mesa y uva fina, el color y el tamaño del fruto son factores importantes que influyen en el valor comercial del producto. Así, algunos genotipos, cuando se cultivan en regiones o en épocas calurosas, pueden presentar deficiencia en su coloración. Actualmente, se

reconoce que el color de las uvas está relacionado, notablemente, con los pigmentos presentes en los hollejos, llamados antocianinas, y que su acumulación está controlada, al menos en parte, por el regulador vegetal **Ácido Abscísico (ABA)**. Por lo tanto, la aplicación de productos que contengan concentraciones adecuadas de **Ácido Abscísico (ABA)** puede cumplir este objetivo, especialmente cuando se asocia con selenio. Por otro lado, el uso de productos con **Giberelinas**, principalmente GA3, son ampliamente utilizados en cultivos de uva sin semilla (frutos partenocárpicos) y contribuyen significativamente al aumento del tamaño y masa de las bayas, asegurando la obtención de racimos en estándares comerciales.

Finalmente, no hay que olvidar que las plantas pueden recibir ayuda de microorganismos específicos añadidos al sistema o presentes de forma natural en ambientes no perturbados o equilibrados. Tal microbioma puede poner a disposición diferentes tipos de metabolitos a lo largo del ciclo, incluidas sustancias hormonales como auxinas, citoquininas, giberelinas, estrigolactonas, jasmonatos y esteroides, entre otros, que pueden favorecer la vida vegetal.

Consideraciones finales

La esencia del proceso de producción agrícola se reduce a la obtención de la máxima tasa neta de fotosíntesis, que depende de las condiciones de estrés a las que se ve sometida la planta. Por lo tanto, todas las posibles estrategias involucradas en la mitigación de los efectos de las condiciones adversas deben implementarse de manera conjunta, con responsabilidad y conocimiento.

Por tanto, en este contexto, el uso racional y juicioso de nutrientes especiales (calcio, magnesio, cobalto, selenio y níquel), aditivos fisiológicos (antioxidantes no enzimáticos, poliaminas y aminoácidos específicos) y bioestimulantes o biorreguladores de calidad, asume un papel fundamental en desencadenar las numerosas acciones fisiológicas capaces de

revertir situaciones estresantes; fortalecer los mecanismos de defensa y adaptación de la planta y asegurar el uso efectivo de los factores de

producción, resultando en un mejor desempeño y mayor productividad, de forma rentable y sustentable.

¿Cómo encajan los biofertilizantes en el modelo de Agricultura 4.0?

Fabrizio Dario Cassán

Laboratorio de Fisiología Vegetal e Interacción planta-microorganismo. Instituto de Investigaciones Agrobiotecnológicas. INIAB-CONICET-UNRC
Contacto: fcassan@exa.unrc.edu.ar

Los productos biológicos en el contexto de una Agricultura 4.0

La agricultura debe aumentar la productividad de los cultivos de manera sostenible. Se considera bioinsumo a todo insumo biológico, de origen animal, vegetal o microbiano, que utilizado en agricultura, genera un impacto positivo en los cultivos (definición propuesta por el Comité Asesor en Bioinsumos para Agricultura o CABUA en 2013). En nuestro país, los productos denominados como bioinsumos, son comúnmente puestos en el mercado bajo diferentes denominaciones (inoculantes, biofertilizantes, bioestimulantes, etc.); sin embargo, la normativa, vigente, cuya última modificación fue introducida en el año 2011, considera que los productos biológicos para agricultura (no definidos como bioinsumos en la letra de la ley), solo se clasifican en dos categorías para su registro, control y comercialización, biofertilizantes y biopesticidas. Un fertilizante se utiliza para mejorar el crecimiento de las plantas y aumentar su rendimiento (en el caso de cultivos) desde la perspectiva de su aporte de macro o micronutrientes en composición (en el sentido *sensu stricto*), pero en nuestro país, los productos biológicos asociados a la nutrición mineral o al crecimiento de las plantas o al aumento de su tolerancia a condiciones desfavorables, se registran y comercializan como fertilizantes biológicos (biofertilizantes), pero paradójicamente no aportan nutrientes en composición. Por ejemplo, los inoculantes para leguminosas formulados con rizobios, claramente no aportan elementos minerales en composición, pero si las bacterias, viables y fisiológicamente capaces de biodisponer nitrógeno para las plantas, a través del establecimiento de una simbiosis y la fijación biológica de este elemento. Diferencias tan espectaculares como la capacidad de una bacteria para fijar nitrógeno, solubilizar fósforo o potasio, producir compuestos con capacidad de aumentar el crecimiento de una planta o su tolerancia a estrés (fitohormonas), parecen ser lo mismo

desde el punto de vista normativo y se resumen bajo el registro comercial de biofertilizante. En un escenario en el que Argentina es un productor consolidado de tecnologías de base biológica y más de 50 años de experiencia en el desarrollo y utilización de productos para agricultura, además de un centenar de empresas instaladas en el país, consideramos necesario modificar la normativa vigente y adecuar los beneficios aportados por cada microorganismo a un tipo de producto en particular.

¿Se considera el uso de biofertilizantes como una práctica consolidada?

La diferencia parece simple en el caso de productos formulados con bacterias simbióticas fijadoras de nitrógeno para leguminosas, como la soja, donde la simbiosis goza de un gran prestigio desde el punto de vista agronómico y en la actualidad es la fuente más importante para la captación de nitrógeno desde la atmósfera en sistemas agrícolas. La cantidad de nitrógeno fijado en condiciones agronómicas por una leguminosa, como la soja, puede alcanzar los 300 kg.ha.año⁻¹ y evita el requerimiento de fertilización nitrogenada. Por otro lado, la inoculación impacta en el cultivo con incrementos de rendimiento de aprox. 10% (250 kg.ha⁻¹). Nadie puede discutir que la inoculación (biofertilización) en cultivos de leguminosas es una práctica consolidada, pero ¿Cuál es el estado de situación de otros microorganismos no rizobiales y su aplicación en cultivos de no-leguminosas? *Azospirillum* sp. es uno de los géneros de rizobacterias promotoras del crecimiento más estudiados en todo el mundo y uno de los más utilizados en nuestro país para la formulación de inoculantes destinados al tratamiento de especies vegetales no-leguminosas y en los últimos años, de leguminosas en co-inoculación con rizobios. *Azospirillum* sp. puede mejorar el crecimiento y desarrollo vegetal debido a la expresión de

diferentes mecanismos fisiológicos o bioquímicos directos e indirectos, que en la actualidad se consideran dentro de un modelo de mayor complejidad. El primer mecanismo propuesto para explicar la capacidad de promoción de crecimiento de esta bacteria estuvo asociado a la fijación no simbiótica de nitrógeno; sin embargo, este mecanismo ha tenido menos significancia agronómica de la que se esperaba inicialmente y por ello se han propuesto y estudiado otros mecanismos, como la producción de fitohormonas, como las auxinas, pero principalmente ácido indol-3-acético (AIA). Estas moléculas tienen capacidad de modificar el metabolismo y la morfología de la raíz provocando una mayor captación de agua y nutrientes en las plantas inoculadas. Existen, en la actualidad, numerosos reportes que demuestran la capacidad de diferentes cepas de *A. brasilense* y *A. argentinense* para mejorar la incorporación y asimilación de N aportado por fertilizantes nitrogenados en cultivos como maíz, trigo, sorgo, arroz, papa y mandioca, en condiciones agronómicas. En tales trabajos se ha sugerido una reducción de la fertilización nitrogenada promedio de un 25% y con reportes máximos de hasta un 50%. Así, la inoculación con *Azospirillum* constituye una alternativa eficiente y sustentable para la Agricultura 4.0, principalmente a nivel de la reducción del uso de fertilizantes químicos nitrogenados. La aplicación excesiva de nitrógeno mineral, se ha asociado al proceso de calentamiento global por la emisión de gases de efecto invernadero y a la reducción de la fertilidad en los suelos por la pérdida de biodiversidad. Se estima que la inoculación con esta bacteria podría ahorrar hasta u\$s 15 ha⁻¹ y evitar la emisión de 236 kg de CO₂-e ha⁻¹ con un impacto económico global de u\$s 1,2 billones por año. Entre 2021-2022 un total de aprox. 18,0 millones de dosis de productos a base de *Azospirillum* fueron comercializados en América del Sur para el tratamiento de maíz, soja y otras leguminosas (maní, poroto), trigo, sorgo,

girasol, hortalizas, frutales etc. El aumento de rendimiento por la inoculación se estima entre 4-14% dependiendo del tipo de cultivo y la frecuencia de éxito cercana al 80% (no ten diferente al que se estima en rizobios). Teniendo en cuenta esta información, la pregunta es ¿Podemos considerar esta tecnología consolidada?

Bibliografía recomendada

- Baldani V. Baldani I. Döbereiner J. 1987. Biol Fert Soil 4:37-40.
- Bashan Y, Holguin G, de-Bashan LE. 2004. Can J Microbiol 50:521-577.
- Bashan Y. and de-Bashan L. 2010. Advances in Agronomy. 108: 77-136
- Cassán F, Coniglio A, López G, Molina R, Nieves S, et al. 2020. Biol Fert Soils, 56, 461-479.
- Cassán F. & Diaz-Zorita M. 2016. Soil Biol. Biochem. 103 117-130.
- Díaz-Zorita M. & Fernández-Canigia M. 2009. Eur J Soil Biol, 45(1):3-11.
- Díaz-Zorita M. and Fernández Canigia M. 2008. En: *Azospirillum* sp. AAM. Argentina.
- Dobbelaere S. Croonenborghs A. Thys A. Broek A. Vanderleyden J. 1999. Plant Soil 212:155-164.
- Döbereiner J. et al 1995. En: Como Isolar e Identificar bacterias diazotróficas. UPFS. Brasil.
- Kennedy I. et al. 1997. Plant Soil 194(1/2): 65-79.
- Maddonna G, Ruiz R, Vilariño P, García de Salamone I. 2004.
- Micucci et al. 2010. Mundo Soja-Maíz. 2011. Argentina.
- Okon Y, Heytler P, Hardy W. 1983. Appl Environ Microbiol 46:694-697.
- Okon Y. 1985. Trends Biotechnol. 3: 223-228.
- Puente M, Gualpa J, López G, Molina R, Carletti S. & Cassán F. 2018. Symbiosis, 76, 41-49.
- Spaepen S. Dobbelaere S. Croonenborghs A. and Vanderleyden J. 2008. Plant Soil. 312:15-23.
- Steenhoudt O & Vanderleyden J. 2000. FEMS Microbiol Rev, vol. 24, no. 4, pp. 487-506
- Tien T. Gaskins M. and Hubbell D. 1979. Appl. Environ. Microbiol. 37:1016-1024.
- Vande Broek A. Lambrecht M. Eggermont K. Vanderleyden J. 1999. J Bacteriol 181:1338-1342

Fertilización o Nutrición Foliar de los Cultivos El desafío de reducir las dosis de insumos y aumentar la productividad al mismo tiempo

César E. Quintero

Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Entre Ríos
cesar.quintero@uner.edu.ar

Introducción

La nutrición foliar se refiere a la alimentación de las plantas a través de los tejidos aéreos con nutrientes minerales esenciales. Dejo de lado aquí los bioestimulantes y otro tipo de productos que provocan un mayor crecimiento o resistencia al estrés. En 2019 hice una primera presentación sobre este tema destacando algunos aspectos relevantes que repaso brevemente (Quintero, 2019).

La aplicación foliar de nutrientes es una estrategia importante de manejo para maximizar los rendimientos de los cultivos que puede complementar la fertilización del suelo. Cuando los nutrientes se aplican a los suelos, son absorbidos por las raíces de las plantas y se trasladan a las partes aéreas. En caso de aplicación foliar, los nutrientes penetran en la cutícula de la hoja o los estomas y luego ingresan a las células. Por lo tanto, la respuesta del cultivo ocurre en menor tiempo en la aplicación foliar en comparación con la aplicación al suelo (Fageria, et al. 2009).

La fertilización tradicional al suelo es la más utilizada y racionalmente aceptada. Sin embargo, la eficiencia de uso de los fertilizantes tradicionales no es lo que uno quisiera. En el caso de la fertilización de cereales con nitrógeno (N), se sabe que la eficiencia de utilización del N es inferior al 50%. Para el caso del fósforo (P), que interactúa muy fuertemente con los sólidos del suelo, la eficiencia de utilización es mucho más baja aún. Esto ha llevado, en algunos países, al uso de dosis de fertilizantes elevadas y

consecuentemente a la contaminación de suelos y aguas (Fernández et al. 2013).

La fertilización foliar surge hoy entonces como una alternativa más amigable con el ambiente dado que el nutriente colocado directamente sobre el tejido vegetal, durante el período crítico de requerimiento, tendría una eficiencia de utilización muy superior y menor riesgo de contaminación (Marschner, 2012).

Para todos los nutrientes (móviles e inmóviles dentro de la planta) el papel más relevante de la fertilización foliar es prevenir deficiencias inmediatas y transitorias que no se pueden abordar de forma rápida por aplicaciones al suelo.

¿Cuándo se dan condiciones oportunas para la fertilización foliar?

Fernández, et al. (2013) enumeran las condiciones en las cuales la fertilización foliar puede ser exitosa:

1. Cuando el abastecimiento de algunos nutrientes por parte del suelo es deficiente y no se ha fertilizado adecuadamente por la vía tradicional.
2. En los períodos de crecimiento pico de los cultivos que generan una demanda de nutrientes que excede el suministro de nutrientes incluso en un suelo fértil o bien fertilizado.
3. En los frutales, durante principios de la primavera, cuando muchas especies de hoja caduca florecen y fructifican y la humedad o temperatura del suelo no son

favorables para la absorción de nutrientes del suelo.

4. Cuando la arquitectura de la planta y el desarrollo de órganos crean una demanda local de nutrientes que excede la capacidad de entrega o transporte dentro de la planta por limitaciones en el transporte de elementos del floema-inmóviles a órganos con conectividad vascular inadecuada o baja transpiración.
5. Biofortificación de cultivos. Especialmente para mejorar el contenido de hierro (Fe) y zinc (Zn) en los granos y su biodisponibilidad como alimentos.

¿Qué expectativa de respuesta a la fertilización foliar tenemos?

La posibilidad de administrar nutrientes por las hojas tiene limitaciones fisiológicas en las cantidades a colocar en cada aplicación (por la fitotoxicidad) y económicas (dado los costos de la aplicación) que reducen el número de aplicaciones. Las expectativas de respuestas son proporcionales a las cantidades aportadas respecto a la demanda.

En términos generales, Argentina presenta una muy baja tasa de aplicación de fertilizantes, siendo una de las zonas agrícolas del mundo con mayor desbalance de P y otros elementos como el potasio (K). Sin embargo, existen productores que aplican alta tecnología y fertilizan adecuadamente. Los fertilizantes foliares podrían mejorar los rendimientos en ambos casos. Sobre todo, si se aplican como

complemento o como aporte extra que se suma a la fertilización que se realiza actualmente.

En los cultivos anuales de grano, la fertilización foliar puede ser beneficiosa cuando existen deficiencias claras de algún elemento como Zn o N y cuando las aplicaciones coinciden con el inicio del período de mayor demanda de nutrientes.

En una encuesta reciente realizada por Fertilizar AC en Argentina, se pudo apreciar que 18% de los productores encuestados utilizan fertilizantes foliares, mayormente en soja, trigo y maíz (**Tabla 1**). El objetivo de su uso es principalmente aumentar los rendimientos, aunque piensan también en la nutrición, la disminución del estrés y la mejora en la calidad del producto.

Los productores destacan como ventajas de la utilización de foliares el incremento de rendimientos, la mejor absorción, la mayor eficiencia de utilización de los nutrientes y la facilidad de manejo (**Tabla 2**). La principal desventaja es el costo de los productos.

El análisis de las ventas de productos de las distintas compañías que proveen fertilizantes foliares en Argentina, en los últimos años, indica que su utilización en cultivos extensivos cubre más del 10% de la superficie, con un interés creciente. En cultivos intensivos, el uso de nutrientes foliares ocupa un volumen de productos similar, en una superficie significativamente menor. Por lo cual se puede decir que la fertilización foliar en cultivos intensivos es muy frecuente y de amplia cobertura con aplicaciones múltiples a lo largo del ciclo de producción.

Tabla 1. Encuesta de uso de fertilizantes foliares. Fertilizar AC, 2022.

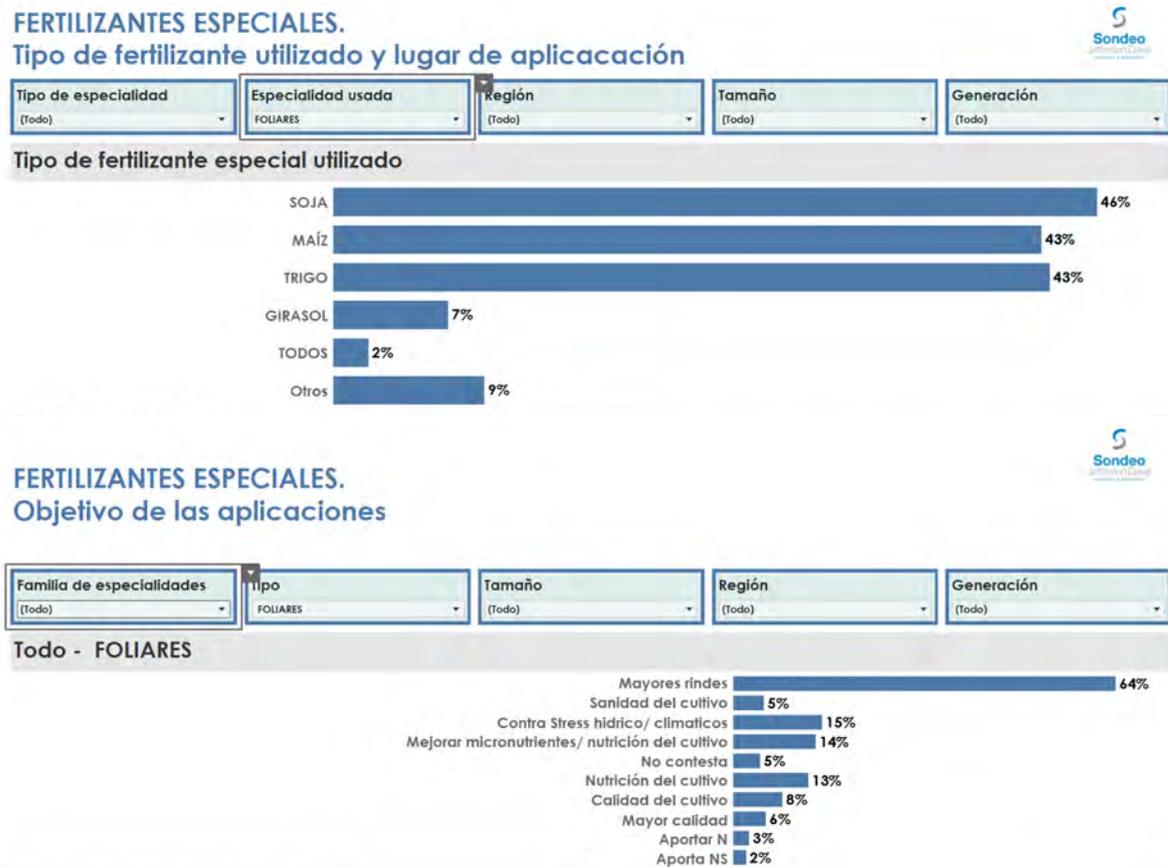
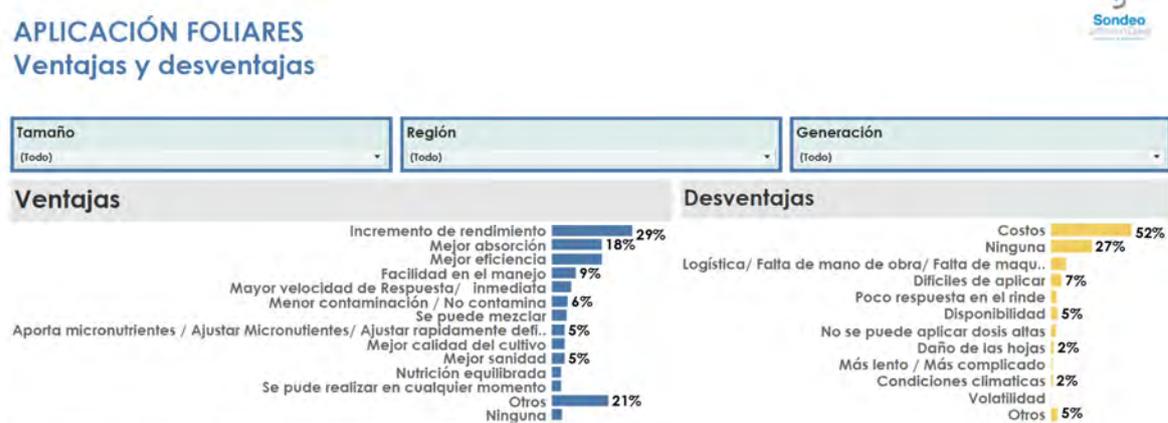


Tabla 2. Encuesta de uso de fertilizantes foliares, ventajas y desventajas. Fertilizar AC, 2022.



Investigaciones y experiencias de fertilización foliar

Las publicaciones científicas sobre fertilización foliar son muy abundantes en los

últimos años. En una revisión reciente, Niu et al. (2021) sostienen que el uso de grandes cantidades de fertilizantes químicos promueve la agricultura de alto rendimiento, pero también está asociado con una serie de problemas, como baja eficiencia de utilización de los nutrientes, acidificación y salinización del suelo. Estudios exhaustivos han demostrado que la aplicación de fertilizante

quelado sobre las hojas puede reducir la cantidad total de fertilizante aplicado y lograr una alta eficiencia de uso del fertilizante. La aplicación de fertilizantes foliares junto con la fertilización del suelo es un método eficaz para aumentar los contenidos de oligoelementos y el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, la cantidad óptima y el método de aplicación de elementos nutritivos deben determinarse de acuerdo con las condiciones locales y una evaluación integral del estado de fertilidad del suelo que se va a cultivar. Se necesitan estudios sistemáticos de la eficiencia de la fertilización de diferentes combinaciones de fertilizantes de suelo y foliar, especialmente con respecto a las interacciones entre los nutrientes foliares y los nutrientes del suelo, para establecer un modelo de fertilización sistemático y científico, promover el uso generalizado de fertilizantes foliares en la producción agrícola y reducir el impacto ecológico de los fertilizantes químicos en el medio ambiente.

Giordano et al. (2023) realizaron un metaanálisis sobre la respuesta del trigo al N tardío. Mostraron que la aplicación tardía de N fue neutral para el rendimiento y mejoró la concentración de proteínas de los granos. La respuesta en proteínas a la fertilización tardía fue mayor con una mayor proporción de N tardío en relación con el N total, cuando se aplicó más tarde dentro de la ventana GS 37-71 y se utilizaron fuentes de fertilizantes foliares. También ocurrieron mayores respuestas en ambientes de alto rendimiento donde las condiciones climáticas eran favorables en el período crítico. La fertilización foliar mejoró el porcentaje de proteína de manera más consistente que los fertilizantes del suelo. La absorción de N de los fertilizantes foliares no depende de la lluvia, lo que brinda ventajas particularmente en entornos donde la disminución del suministro de agua posterior a la anthesis puede comprometer la absorción de N del suelo.

Con un objetivo similar, Di Mauro et al. (2023) analizaron prácticas de nutrición para aumentar los rendimientos y la proteína de soja en Argentina. La aplicación foliar de 0.4 kg/ha de N y 0.1 kg/ha de B en R5, mostró cambios

significativos en la región central argentina. Para campos de baja productividad, la aplicación de fertilizante foliar rindió 363 kg/ha más que el tratamiento sin aplicación. Por el contrario, no se encontraron diferencias en campos de alta productividad ni tampoco mejoras en la concentración de proteína.

Motivados en que más de 25% de la población mundial padece carencias de micronutrientes, Saquee et al. (2023) hicieron una revisión enfocados en el rendimiento y la calidad del trigo. Encontraron que la aplicación de micronutrientes mezclados con macronutrientes aumentó significativamente el crecimiento de las plantas, las características fisiológicas, los componentes del rendimiento, el rendimiento del grano y las características de calidad. Entre los tipos de aplicaciones, la aplicación foliar de nutrientes fue muy rentable debido a su eficiencia en términos económicos, ecológicos y de rendimiento cualitativo y cuantitativo. Para los autores, el cálculo de la dosis correcta de micronutrientes debe basarse en el balance de nutrientes del campo. El rendimiento esperado del trigo determina la cantidad de nutrientes que deben estar disponibles.

Por otro lado, necesitamos considerar cuidadosamente los nutrientes disponibles basados en análisis de suelo y todos los diferentes aportes de nutrientes, como los residuos de cultivos, insumos orgánicos, deposición atmosférica y nutrientes en el agua de riego, etc. Los requerimientos de nutrientes de una planta cambian durante su desarrollo. En el cultivo de trigo, existen tres principales periodos "críticos" en los que se observa la mayor necesidad de nutrientes: (1) germinación: la nutrición adecuada temprana estimula el crecimiento del brote principal, el establecimiento de brotes laterales en las axilas de las hojas en germinación y el crecimiento del sistema radical; (2) macollamiento: la aparición de macollos activa procesos morfofisiológicos, asegurando el crecimiento de un sistema radicular secundario; y (3) la etapa de la hoja bandera, que marca el comienzo de la aparición de las espigas. La fertilización foliar, en esta etapa, mejora cualitativamente los procesos de floración,

formación de granos y desarrollo. Sin embargo, es muy importante que los agricultores comprendan que la productividad de los cultivos es un proceso gradual. Por lo tanto, si no se presta atención a ciertos aspectos de la producción del cultivo en las primeras etapas de desarrollo, las prácticas agronómicas en las últimas fases del desarrollo de la planta no lo pueden compensar.

El P, un nutriente esencial para las plantas, es clave para numerosas estructuras y procesos en los cultivos y su deficiencia puede restringir severamente el rendimiento y la calidad. Como la disponibilidad de P del suelo para la absorción de las plantas suele ser limitada, la aplicación foliar de P puede ser un medio alternativo para suministrar P a las plantas durante el período de crecimiento. Los resultados de Duarte et al. (2023), sugieren que la aplicación foliar de Pi después de la floración de la soja, al proporcionar una sincronización adecuada entre el suministro de nutrientes y la demanda de la planta, permite aliviar las deficiencias de P y mejorar el rendimiento. Tales resultados están en línea con el uso de la fertilización foliar orientada al objetivo de cubrir las demandas nutricionales en etapas fenológicas críticas para mejorar la estabilidad del rendimiento en condiciones desfavorables para una absorción eficiente de las raíces.

En un trabajo anterior, Henningsen et al. (2022), encontraron que la aplicación foliar de P aumentó significativamente la asimilación de CO₂ y los valores SPAD y además, mejoró la producción de biomasa en todos los componentes de la planta. El análisis elemental reveló mayores concentraciones de P en los tejidos después de la aplicación foliar de P en comparación con las plantas deficientes. Mientras que el aumento del crecimiento de las plantas deficientes en P fue promovido constantemente por la aplicación de P foliar durante todo el período experimental, el efecto positivo sobre la asimilación de CO₂ y la concentración de P fue transitorio y desapareció algunos días después del tratamiento foliar. Como conclusión, la fertilización foliar con P mejoró los parámetros fisiológicos y agronómicos de la planta, pero no logró restaurar completamente la funcionalidad de las plantas de

maíz con deficiencia de P durante un período experimental prolongado en comparación con plantas bien nutridas desde la raíz.

La fertilización foliar se ha utilizado como una estrategia complementaria a la nutrición de las plantas, especialmente en cultivos con alto potencial de rendimiento. La aplicación de nutrientes en pequeñas dosis estimula la fotosíntesis y aumenta el rendimiento. En Brasil, para la soja y el maíz, Oliveira et al. (2022) encontraron que la aplicación de molibdeno (Mo) aumentó la actividad de nitrato reductasa de la hoja, el contenido de N y proteína, la actividad de Rubisco, la fotosíntesis neta y el rendimiento de grano. Estos resultados indican que la fertilización foliar con Mo puede mejorar de manera eficiente el metabolismo del N y la respuesta de la planta a la fijación de carbono, lo que resulta en mejores rendimientos de los cultivos. No se observaron efectos adversos de la aplicación de Mo. Por el contrario, los efectos positivos de la fertilización foliar con Mo fueron claros con la aplicación de sólo 30 gramos de Mo por hectárea.

La introducción de la nanotecnología en la ciencia agrícola allana el camino para la creación de nuevas estrategias de aplicación de nutrientes. Debido a su pequeño tamaño inherente y sus propiedades de superficie adaptables, las nanopartículas (1-100 nm) permiten la entrega de nutrientes esenciales para las plantas en una forma sustancialmente diferente de sus contrapartes de iones minerales. Además, la modificación de la química de la superficie de las nanofertilizantes (NF) permite una mejor adhesión y penetración en la superficie de la hoja, así como el transporte a través de diferentes barreras celulares. En contraste con los fertilizantes convencionales, los NF ofrecen una serie de beneficios, que incluyen solubilidad variable, alta consistencia, efectividad, descarga controlada en el tiempo, actividad específica mejorada con concentración efectiva y menos ecotoxicidad con una entrega segura y simple (Nitesh et al. 2023). Los avances recientes, especialmente dentro de la investigación biomédica, ahora brindan herramientas interesantes que esperan su implementación en

la agricultura. Sin embargo, la mayoría de las revisiones actuales exageran la importancia de la nanofertilización para la agronomía, ya que sólo un número limitado de estudios presenta evidencia experimental significativa de la capacidad de los nanofertilizantes para superar a sus contrapartes convencionales (Husted et al. 2023).

En síntesis, la fertilización foliar se puede visualizar como una alternativa complementaria al uso de fertilizantes de suelo que permite mejorar la eficiencia de uso de los nutrientes aplicados cubriendo necesidades específicas en momentos críticos para los cultivos. El desarrollo de nuevos productos y tecnologías contribuirá a un uso más intensivo de los foliares, a partir de la evidencia que proporcionen los estudios científicos en distintos cultivos y regiones.

Bibliografía

- Di Mauro Guido, Raí Schwalbert, Santiago Alvarez Prado, Matías G. Saks, Hugo Ramírez, Jerónimo Costanzi, Gonzalo Parra.** 2023. Exploring practical nutrition options for maximizing seed yield and protein concentration in soybean. *European Journal of Agronomy* 146 (2023) 126794.
- Duarte, F. C. N., Cipriano, M. A. P., Andrade, S. A. L., & Zambrosi, F. C. B.** (2023). Foliar application of phosphite reduces grain weight of soybean facing postflowering phosphorus deficiency. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 186, 30–37.
- Fageria N.K., Barbosa Filho M.P., Moreira A. y Guimarães C.M.** 2009. Foliar Fertilization of Crop Plants. *Journal of Plant Nutrition*. 32: 1044–1064.
- Fernández V., Sotiropoulos T. y Brown P.** 2013. Foliar Fertilization: Scientific Principles and Field Practices. Paris. International Fertilizer Industry Association.
- Giordano, Nicolas, Víctor O. Sadras, Rómulo P. Lollato** 2023. Late-season nitrogen application increases grain protein concentration and is neutral for yield in wheat. A global meta-analysis. *Field Crops Research* 290 (2023) 108740.
- Henningsen, J.N.; Görlach, B.M.; Fernández, V.; Dölger, J.L.; Buhk, A.; Mühling, K.H.** 2022. Foliar P Application Cannot Fully Restore Photosynthetic Capacity, P Nutrient Status, and Growth of P Deficient Maize (*Zea mays L.*). *Plants* 2022, 11, 2986.
- Husted Søren, Francesco Minutello, Andrea Pinna, Stine Le Tougaard, Pauline Møs, and Peter M. Kopittke.** 2023. Review. What is missing to advance foliar fertilization using nanotechnology? *Trends in Plant Science*, Vol. 28, No. 1
- Junhao Niu, Chang Liu, Mingli Huang, Kezhong Liu, Dongyun Yan.** 2021. Effects of Foliar Fertilization: a Review of Current Status and Future Perspectives *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* (2021) 21:104–118.
- Marschner P.** 2012. Mineral Nutrition of Higher Plants. San Diego: Academic Press.
- Nitesh Kumar, Shiv Ram Samota, Karnam Venkatesh, S.C. Tripathi.** 2023. Global trends in use of nanofertilizers for crop production: Advantages and constraints – A review. *Soil & Tillage Research* 228 (2023) 105645.
- Oliveira SL, Crusciol CAC, Rodrigues VA, Galeriani TM, Portugal JR, Bossolani JW, Moretti LG, Calonego JC and Cantarella H.** 2022. Molybdenum Foliar Fertilization Improves Photosynthetic Metabolism and Grain Yields of Field-Grown Soybean and Maize. *Front. Plant Sci.* 13:887682
- Quintero, C.** 2019. Fertilización Foliar. ¿Porqué? ¿Para qué? *Actas Simposio Fertilidad 2019*. 131-135.
- Saquee, F.S.; Diakite, S.; Kavhiza, N.J.; Pakina, E.; Zargar, M.** 2023. The Efficacy of Micronutrient Fertilizers on the Yield Formulation and Quality of Wheat Grains. *Agronomy* 2023, 13, 566.

Fertilizantes de eficiencia mejorada y su uso en agroecosistemas

Martín Torres Duggan¹

(1) Tecnoagro; Girardot 1331 (1427) CABA; email: mjjtorresduggan@gmail.com

El objetivo del presente escrito es describir y analizar las características principales y los beneficios agronómicos y ambientales del uso de fertilizantes de eficiencia mejorada en sistemas de producción de granos de la Región Pampeana argentina.

1. ¿Qué son y cómo funcionan los fertilizantes de eficiencia mejorada?

Los fertilizantes de eficiencia mejorada (FEM) se denominan a todos aquellos fertilizantes que permiten aumentar la eficiencia de uso de los nutrientes aplicados, mejorando la productividad de los cultivos y la sustentabilidad en el manejo de los nutrientes a través de la reducción de pérdidas de éstos fuera del sistema suelo-cultivo.

De acuerdo con Reetz (2016), la eficiencia de los fertilizantes se puede mejorar reduciendo o retardando la liberación de los nutrientes; inhibiendo la conversión de nutrientes a formas menos estables en el suelo y aumentando la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Cabe aclarar que el término “eficiencia mejorada” no debería interpretarse como un atributo intrínseco del fertilizante. La “eficiencia mejorada” siempre se debe analizar en el contexto del uso del fertilizante, sobre todo la condición de aplicación, por ejemplo, las características del suelo o meteorológica en el momento de aplicación. Estas condiciones de aplicación son las que se deben evaluar adecuadamente para tener una mirada realista de los beneficios que pueden tener la utilización de los fertilizantes de eficiencia mejorada (FEM) en agroecosistemas. Así en términos muy generales, en algunos tipos de suelos y/o condición del ambiente biofísico (e.g. temperatura), la aplicación de los FEM puede reducir los procesos de inmovilización y/o fijación en el suelo o bien minimizar las pérdidas de los nutrientes fuera del sistema suelo-cultivo. En este tipo de contexto es cuando son esperables mejoras en la eficiencia de uso de los nutrientes aplicados o en el rendimiento de los cultivos, por consiguiente, se reduce la vulnerabilidad ambiental de la fertilización.

Los principales desarrollos que se han propuesto para mejorar la eficiencia de los fertilizantes son los siguientes:

- a. Uso de coberturas (*coatings*) semipermeables que por sus características (micromorfología, espesor, porosidad, etc.) reduzcan la tasa de disolución de los nutrientes en el suelo (e.g. ureas recubiertas con polímeros y/o azufre elemental). También se los denomina “fertilizantes de liberación controlada” o “fertilizantes recubiertos”
- b. Sustancias que liberan gradualmente el nutriente (e.g. urea formaldehído; ureas tratadas con zeolitas, etc.)
- c. Estabilizadores de nitrógeno, ya sean inhibidores de la ureasa (IU) o inhibidores de la nitrificación (IN) que aumentan el tiempo de residencia del amonio en el suelo reduciendo parcialmente las pérdidas por volatilización, lixiviación y/o desnitrificación

Dentro de los fertilizantes de los FEM, la mayor parte de la evidencia científica sobre los beneficios agronómicos y ambientales proviene de la evaluación de aditivos y/o formulaciones que mejoran la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN), con variado impacto sobre el rendimiento en grano. Este tipo de aditivos se los denomina actualmente “estabilizadores de nitrógeno” y se refieren a los tradicionalmente conocidos como inhibidores de la ureasa (IU) y de la nitrificación (IN), que se describen en próximos párrafos.

Otros materiales que se utilizan como aditivos para formular FEM son diversos minerales que pueden mejorar la EUN. El más relevante y estudiado es el uso de zeolitas combinadas con fertilizantes nitrogenados inorgánicos u orgánicos. Las zeolitas son tectosilicatos con

estructura cristalina muy particular con una red de nanoporos externos e internos intercomunicados que permiten la retención e intercambio reversible de agua, amonio y potasio con las plantas. Así, la incorporación de zeolitas (existen diferentes series mineralógicas), en fertilizantes como urea o estiércol reduce las pérdidas tanto por volatilización de amoníaco como por lixiviación de nitratos, siempre que se presenten condiciones predisponentes. Las zeolitas también se pueden aplicar en forma independiente o como materia prima de producto que se aplican como acondicionadores de suelos que mejoran la conservación de agua del suelo y/o el agua útil para las plantas. La Argentina cuenta con diversos recursos geológicos de rocas y minerales con potencial de uso en el ámbito agropecuario, incluyendo a las rocas portadoras de minerales de zeolitas. Sin embargo, más allá de disponerse de unos pocos trabajos científicos locales (investigación fundamental), es necesario desarrollar investigación aplicada que permita caracterizar y evaluar los recursos zeolíticos para diferentes usos, y generar así una “línea de base” sobre su calidad agronómica y pautas para dosificar en condiciones de campo.

A diferencia del corpus de conocimiento científico que se ha generado para los estabilizadores de N, no se han publicado avances considerables en la literatura académica que demuestren la eficacia de aditivos que mejoran la eficiencia de los fertilizantes fosfatados sólidos tradicionales (i.e. solubles en agua). En cambio, la aplicación de rocas fosfóricas o fosfáticas (RF) reactivas, principalmente las que contienen francolita (carbonato flúor apatita) como principal constituyente mineralógico, ha demostrado una alta eficiencia agronómica principalmente en suelos con tendencia a la fijación y/o inmovilización del P (e.g. suelos ácidos). Existe un renovado interés en el uso de fosforitas y otras fuentes fosfatadas de origen mineral en sistemas de producción tradicional o bajo agricultura orgánica debido al mayor efecto residual y el menor impacto ambiental de la fertilización fosfatada (e.g. menor escurrimiento de P soluble hacia cuerpos de agua). También se

observan interesantes desarrollos tecnológicos de RF micronizada para ser aplicada mediante riego localizado (en suspensión). En igual sentido, el uso de azufre elemental (AE) micronizado incorporado en mezclas químicas formuladas en base a fuentes fosfatadas como MAP o DAP se consideran una innovación tecnológica relevante. La incorporación de AE micronizado en la matriz de los gránulos aumenta la concentración total de S en los gránulos, y mejora la relación P/S en comparación con mezclas químicas o físicas en donde se utilizan fuentes azufradas sulfatadas. La reducción del tamaño de partículas del AE garantiza una rápida oxidación en el suelo, mientras que su incorporación a los gránulos de mezclas químicas minimiza el riesgo del manipuleo de AE en plantas de fertilizantes (riesgo de detonación en almacenamiento). Es decir, la tendencia es no aplicar AE como fertilizante simple sino incorporado en mezclas químicas.

Por otro lado, existe evidencia científica sobre la mayor EUP de los fertilizantes fosfatados líquidos en suelos calcáreos y/o con alto contenido de carbonatos en la masa de suelos, independientemente de la forma química del P en las formulaciones (i.e. ortofosfato, polifosfato). Así, la aplicación de starters fosfatados líquidos (en solución) aplicados en el surco sobre la semilla o alrededor de ésta puede mejorar la EUP y el rendimiento en suelos que utilizan esta práctica. La misma se encuentra difundida en EE.UU sobre todo complementando la fertilización de base con P que se suele hacer con fertilizantes fosfatados simples, mezclas físicas o químicas. El uso de starters fosfatados líquidos también está creciendo en Argentina y Uruguay. La razón de la mayor EUP de las fuentes fosfatadas líquidas en suelos con alto contenido de carbonatos o con horizontes cálcicos deriva de la menor formación de complejos P-Ca de baja solubilidad, incrementando la eficiencia de recuperación P aparente del P aplicado.

A modo de sumario, en la Tabla 1 se presentan ejemplos de FEM utilizados en cultivos extensivos.

Tabla 1. Algunos fertilizantes de eficiencia mejorada (FEM) en sentido amplio referidos en la literatura académica.

Tipo de fertilizante	Ejemplos de FEM	Posicionamiento agronómico
Nitrogenado	Inhibidores de la ureasa	Mitigación de pérdidas por volatilización de amoníaco (e.g. NBPT, nPPT, zeolitas de la serie Heulandita-Clinoptilolita)
	Inhibidores de la nitrificación	Mitigación de pérdidas por lixiviación de nitratos y desnitrificación (e.g. Nitrapyrin, DCD, DMPP, zeolitas de la serie Heulandita-Clinoptilolita)
	Fertilizantes de liberación controlada	Dependiendo de la condición edáfica (e.g. forma dominante de N mineral, pH, etc.), y del ambiente (e.g. temperatura), estas tecnologías pueden funcionar estabilizando el N ya sea mediante la mitigación de pérdidas por lixiviación de nitratos, volatilización de amoníaco, etc. (e.g. ureas recubiertas con polímeros o azufre elemental).
	Soluciones de UAN	Por la forma de aplicación (chorreado) y su menor contenido de N amídico, presenta baja tasa de volatilización en comparación con la urea aplicada al voleo en cobertura total cuando hay condiciones predisponentes (temperatura media diaria por encima de 15-20°C).
Fosfatado o fosfatado-azufrado	Fuentes de liberación progresiva	Reducen la liberación inmediata de P, aportando P en forma progresiva a lo largo de las rotaciones o secuencias de cultivo (e.g. fosforitas reactivas, principalmente las constituidas por francolitas como componente principal). También es apta para agricultura orgánica y para fertirriego cuando se la aplica micronizada vía riego por goteo.
	Mezclas químicas NPKS o NPS's	Fuentes fosfatadas en donde se agrega azufre elemental o micronutrientes en la matriz de los gránulos, algunas de ellas se han patentado (e.g. Fusion® de Mosaic).
	Fuentes fosfatadas líquidas	Mejoran la eficiencia de uso debido a que se aplican, en general, como starters (i.e. aplicación localizada), y también incrementan la eficiencia de recuperación de P en suelos con alto contenido de carbonatos (menor formación de complejos Ca-P de baja solubilidad)

Fuente: elaboración propia.

2. ¿Qué son y cómo funcionan los fertilizantes de liberación controlada?

Los fertilizantes de liberación controlada incluyen a un heterogéneo grupo de productos que contienen coberturas y/o materiales dentro de los gránulos que regulan la tasa de disolución de los mismos en el suelo y consiguientemente la liberación de nutrientes. Algunos ejemplos conocidos son las ureas recubiertas con azufre elemental (AE) que actúa como una membrana semipermeable y va regulando la salida del amonio, y a su vez por la oxidación del AE se mitiga, parcialmente, la posibilidad de generar emisiones de amoníaco. También son conocidas, aunque no extensivamente utilizadas en la

Argentina, las ureas recubiertas con polímeros flexibles biodegradables, entre otros tantos ejemplos que se pueden mencionar.

Si bien se ha publicado literatura científica describiendo las características de los fertilizantes de liberación controlada, la misma enfatiza modelos de acción generales o esquemáticos (Fig. 1). Conceptualmente, la posibilidad de mejorar la sincronía entre la oferta de nutrientes liberados desde el fertilizante con la demanda de éstos por parte del cultivo es conceptualmente atractiva. Actualmente no se dispone en la Argentina de estudios que hayan evaluado en forma cuantitativa y exhaustiva el impacto de este tipo de tecnologías sobre el rendimiento de los cultivos o sobre el ambiente.

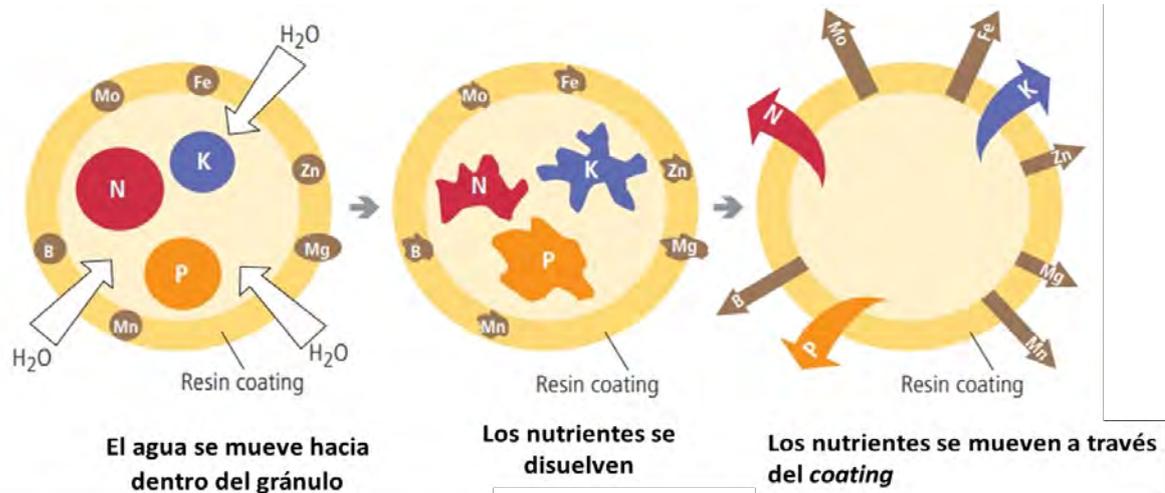


Figura 1. Esquema del modo de acción de un fertilizante de liberación controlada tradicional. Fuente: Adaptado de Trenquel (2010). En: Drechsel et al. (2015)

En los últimos años se han propuesto esquemas que muestran “sistemas inteligentes de entrega de nutrientes” de los fertilizantes de liberación controlada en donde la tasa de disolución de los nutrientes a través de la membrana semipermeable (cobertura del fertilizante) está regulada por la inclusión de sensores de origen químico o biológico que se incorporan en el fertilizante y que se activan ante cambios en variables del entorno del fertilizante (e.g. pH, temperatura, humedad), o bien directamente se propone el encapsulado de microorganismos en el fertilizante que se activan por cambios en la configuración y/o disolución de la membrana semipermeable que rodea al fertilizante (Fig. 2).

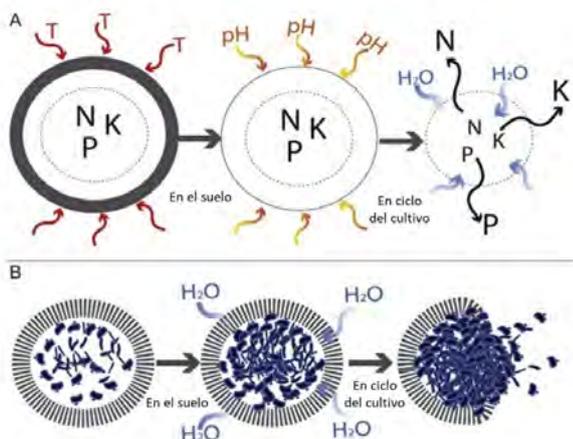


Figura 2. Sistemas avanzados de entrega de nutrientes a partir de fertilizantes de liberación controlada regulados por sensores que captan cambios en el entorno del fertilizante (e.g. temperatura, pH, humedad), o bien basado en el encapsulado de microorganismos(A), Calabi-Foody et al. (2018)

3. ¿Qué son los estabilizadores de nitrógeno y cómo impactan sobre el rendimiento de los cultivos?

Se advierte que en estas mismas actas en donde está presentado este escrito se incluye un trabajo titulado “Estabilizadores de nitrógeno: beneficios agronómicos y ambientales de su utilización en cultivos extensivos” en donde se puede consultar las características y propiedades de los principales productos y/o formulaciones que se utilizan en la Argentina. Por consiguiente, se resumen aspectos generales de su posicionamiento agronómico y los principales beneficios esperados de su aplicación en cultivos extensivos de la Región Pampeana argentina.

3.1. Posicionamiento agronómico de los estabilizadores de nitrógeno

3.1.1 Inhibidores de la ureasa

El principal inhibidor de ureasa (IU) que se ha evaluado en la Argentina ha sido el nBPT, que se incorpora como aditivo de la urea o de soluciones líquidas de N. En los últimos años también se ha evaluado extensivamente la combinación del nBPT con el nPPT (Limus® tecnología patentada).

El uso de IU ha sido extensamente evaluado en la Región Pampeana de Argentina, especialmente en el cultivo de maíz, aunque también se han realizado ensayos en trigo. Las respuestas observadas en maíz variaron entre 300 y 1500 kg/ha (mediana de 500-600 kg/ha). Las mayores respuestas se suelen dar, en términos generales, cuando las pérdidas de N por volatilización

limitan la oferta de N al cultivo. Las respuestas medias suelen ser consistentes en un amplio rango de condiciones edafoclimáticas.

La magnitud de las pérdidas por volatilización de amoníaco suele estar muy asociadas con las temperaturas del suelo (o del aire) imperantes durante la fertilización, y eso permite, predecir en qué condiciones productivas (e.g. latitud y longitud) se puede esperar una mayor o menor capacidad de reducción de las emisiones de amoníaco cuando se aplica urea al voleo. Así, estudios experimentales realizados en la Región Pampeana muestran que las pérdidas de N por volatilización de amoníaco pueden ser muy variables, desde 0 hasta 30% del N aplicado en planteos de siembras temprana de maíz (i.e. septiembre-octubre en Zona Núcleo) y hasta 40% del N aplicado se aplica urea al voleo en fertilizaciones de maíz tardío (i.e. diciembre).

3.1.2 Inhibidores de la nitrificación

A diferencia de otras regiones del mundo en donde se realiza producción extensiva de granos en secano o bajo riego, la utilización de inhibidores de la nitrificación (IN) no es una práctica frecuente en la Región Pampeana a pesar

de existir claras condiciones predisponentes para su utilización, sobre todo un sistema climático con alta variabilidad y con alta frecuencia de eventos extremos, incluyendo años con excesos hídricos.

En la Tabla 2 se presentan los principales IN que se utilizan en el mundo, indicando el tipo de componente o ingrediente activo y el modo de aplicación.

De los IN presentados, el DCD y DMPP se lo utiliza en Argentina, algunos fertilizantes destinados a cultivos intensivos, sobre todo en cultivos bajo riego. En cultivos extensivos, si bien varias empresas han evaluado pre-comercialmente diferentes formulaciones, la industria local no ha fomentado demasiado el uso de este tipo de tecnologías. Esta situación difiere de otros países con sistemas de producción extensiva comparables con la Argentina, en donde se evidencia una creciente adopción de estabilizadores de N, sobre todo la combinación de IU e IN agregados a fertilizantes nitrogenados sólidos o líquidos.

Tabla 2. Principales características de los principales inhibidores de la nitrificación utilizados a escala comercial en el cultivo de maíz.

Nombre	Solubilidad en agua (g L ⁻¹)	Volatilidad relativa	Modo de aplicación
Nitrapyrin (N-Serve)	0,04 (20°C)	Alta	Adecuado para su aplicación junto con N anhidro
Nitrapyrin (Instinct HL)	Miscible	Variable (*)	Apto para mezcla con fertilizantes nitrogenados líquidos y sólidos (**) e impregnación de fertilizantes granulados
DCD	23,0 (13°C)	Baja	Apto para su mezcla con urea u otros fertilizantes nitrogenados
DMPP	-	Baja	Apto para su mezcla con urea u otros fertilizantes nitrogenados

Fuente: Ampliado y adaptado de Trenkel (2010) y Webber y McCann (2015). (*). Protección contra la volatilización del ingrediente activo durante 10 días post-aplicación (luego se requiere incorporación por 10-15 mm de lluvia o riego o mezclado mecánico). (**). Se puede requerir el agregado de compuestos para mejorar su miscibilidad.

Recientemente la empresa Corteva Agriscience lanzó en la Argentina una formulación comercial de Nitrapyrin (Instinct NXTGEN®), molécula ampliamente estudiada y conocida a nivel académico internacional. Los ensayos realizados en maíz la Región Pampeana en el período 2012-2022 en una gran cantidad de

sitios experimentales muestran un 74% de casos con respuesta positiva en rendimiento de grano, con incrementos de 650 kg/ha (7% de mejora) (Fig.3).

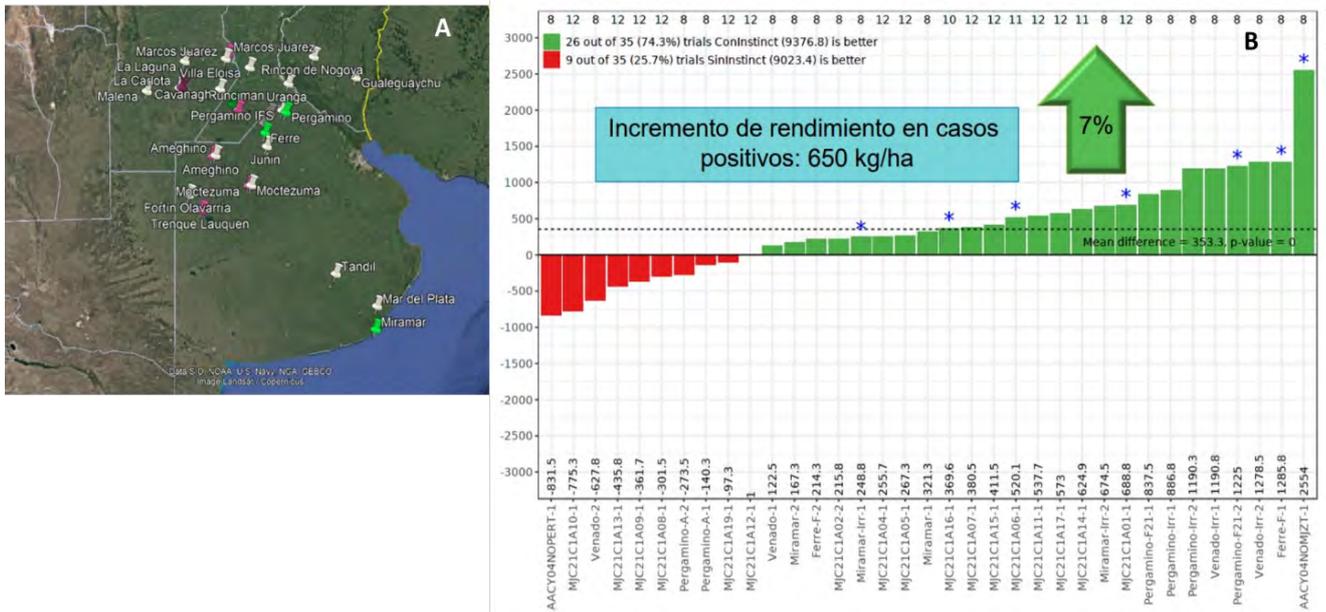


Figura 3. Distribución geográfica (A) y resultados de ensayos (B) de la aplicación de Nitrapyrin en la Región Pampeana de Argentina. Fuente: Corteva Agriscience.

Las respuestas a la aplicación del Nitrapyrin se asociaron con las lluvias ocurridas en los estadios tempranos del cultivo o con el uso del riego (Fig. 4).

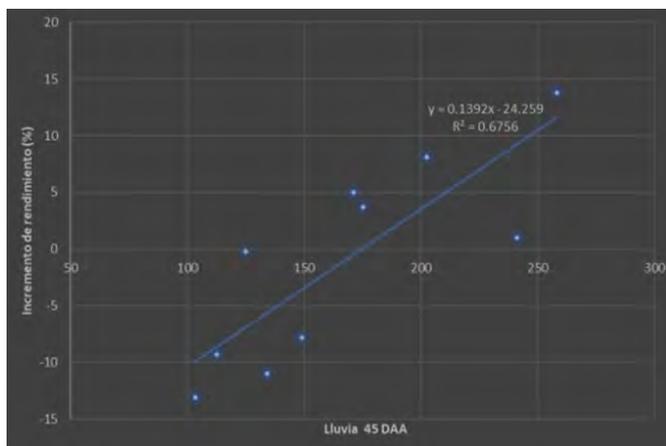


Figura 4. Relación entre la respuesta al agregado de Nitrapyrin (Instinct NXTGEN®) y las precipitaciones acumuladas a los 45 días posteriores a la aplicación.

4. Perspectiva ambiental de fertilizantes de eficiencia mejorada

Si bien el productor agropecuario pondera principalmente la respuesta de la tecnología en términos de aumento de rendimiento o bien el beneficio económico marginal de su aplicación, los beneficios ambientales derivados de la mitigación de GEI, como así también la

posibilidad de incrementar el secuestro de carbono son aspectos cada vez más considerados. Esto se debe a que en los últimos tiempos se observa un desarrollo creciente de “programas de sustentabilidad” o “proyectos de carbono” ofrecidos por empresas proveedoras de insumos y con aval de diferentes empresas certificadoras internacionales, que permiten, mediante variados esquemas, monetizar el uso de innovaciones que mejoran la calidad del suelo o la sustentabilidad del agroecosistema.

De acuerdo con una red de 90 experimentos a campo conducidos por Profertil durante 12 años (campanas 2008/09-2019/20) en 47 localidades, el aumento medio de rendimiento por agregado de inhibidores de la ureasa agregado a la urea determinó efectos positivos en el 67% de los casos, con una respuesta media de 640 kg/ha. Asimismo, se reportó una reducción de 21, y 30% en las emisiones totales y netas, respectivamente (Fig. 5).

A partir de la misma base de datos experimentales se pudo demostrar una mejora del 40% en la eficiencia de las emisiones de GEI (Fig. 6).

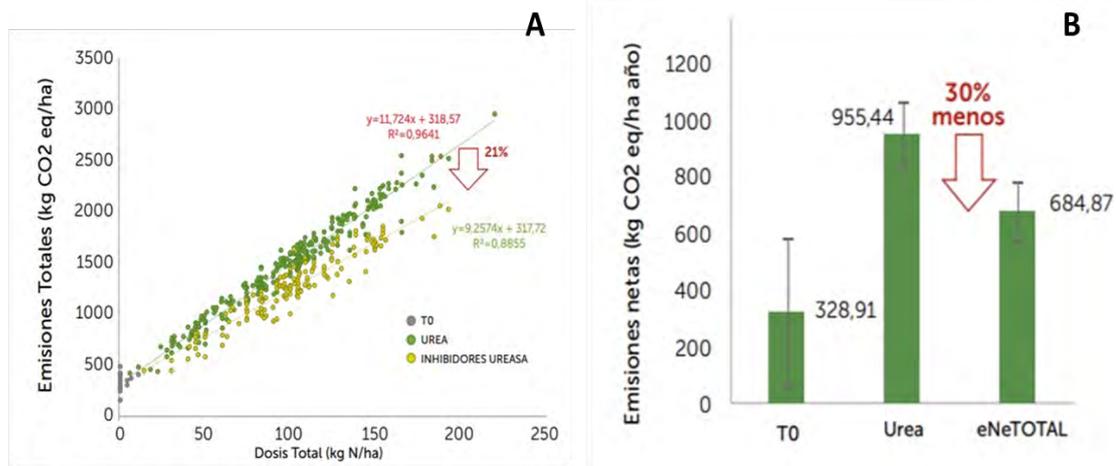


Figura 5. Emisiones totales (kg de CO₂ eq/ha) (A) y netas (B) de la fertilización con urea y urea tratada con inhibidores de la ureasa. Fuente: Profertil 2020.

Eficiencia en términos de Kg de grano/Kg CO₂ eq, emitido

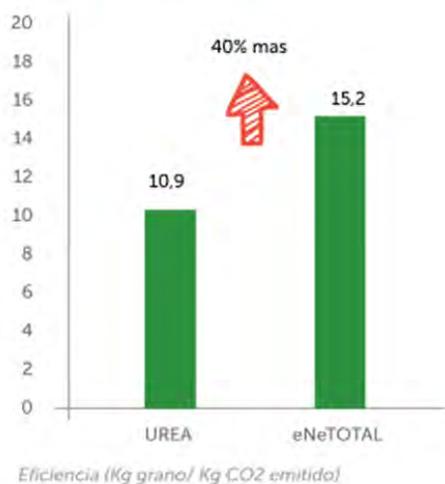


Figura 6 Emisiones expresadas en términos de eficiencia (kg de grano de maíz/kg de CO₂ eq. Emitido). Fuente: Profertil 2020.

Por otro lado, a partir de una revisión de 118 ensayos a campo en maíz llevados a cabo durante 16 años (campañas 2005/06 al 2019/20) en 62 localidades de la Región Pampeana se pudo estudiar el impacto del tipo de FEM en las emisiones totales de GEI. Así, se observó una reducción del 24, 21 y 9% asociado al uso de inhibidor de la nitrificación (DMPP), inhibidor de la ureasa (nBPT) y urea de liberación controlada (urea recubierta con polímero flexible), respectivamente (Fig. 7).

Resultados similares de mitigación de GEI (i.e. reducción de emisiones en rangos de 50-60%) se han observado no solo con el DMPP, sino también con la mayoría de los IN, esto incluye al DCD y el Nitrapyrin. Un detalle de este tema se puede consultar en estas mismas actas en el trabajo titulado “Estabilizadores de nitrógeno: beneficios agronómicos y ambientales de su utilización en cultivos extensivos”.

5. Consideraciones finales

Los fertilizantes de eficiencia mejorada (FEM), en sentido amplio del término, incluyen fuentes de nutrientes o fertilizantes con agregado de aditivos y/o ingredientes que, aplicados bajo determinadas condiciones predisponentes, mejoran la eficiencia de la fertilización, pudiendo así aumentar el rendimiento en grano y mitigar parcialmente las pérdidas de los nutrientes fuera del suelo-cultivo. Bajo esta perspectiva, los beneficios agronómicos y/o ambientales del uso de los FEM se deben analizar en el contexto del sistema de producción. Así, en sistemas productivos en donde se utiliza urea o fuentes que contienen urea (e.g. UAN) bajo condiciones de cultivo predisponentes a las pérdidas por volatilización (e.g. alta temperatura en el momento de aplicación del fertilizante) el uso de inhibidores de la ureasa es una tecnología efectiva para mejorar la EUN y el rendimiento en grano.

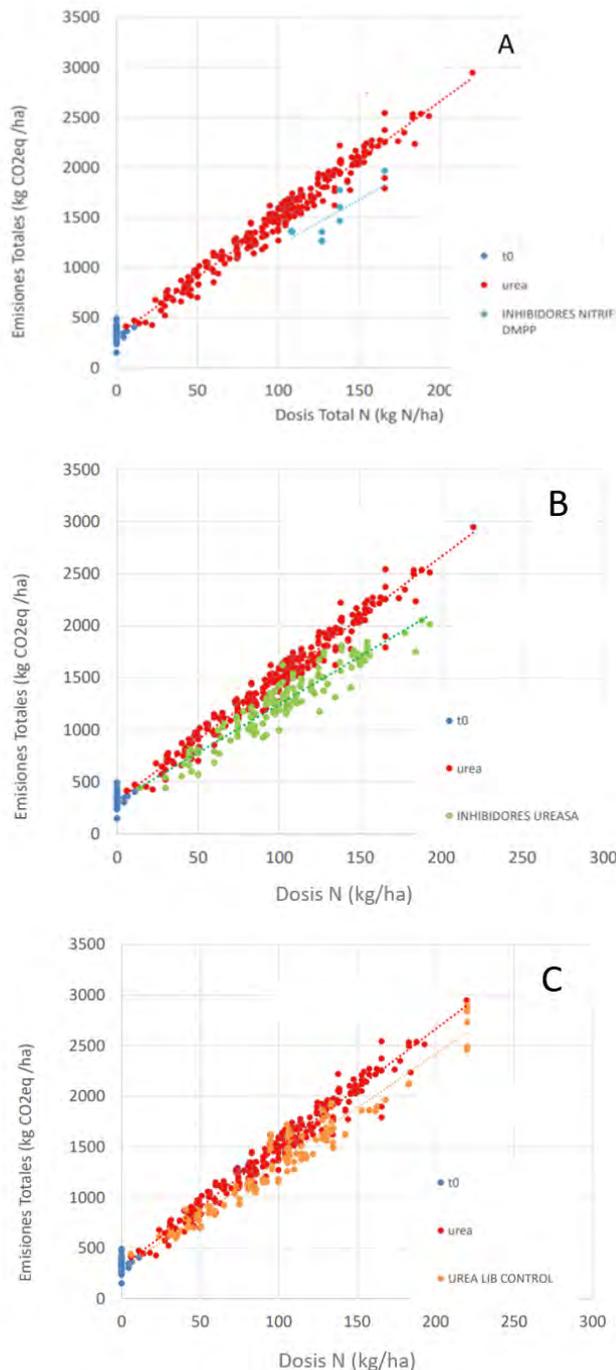


Figura 7. Emisiones totales de GEI de la urea granulada en comparación con inhibidores de la nitrificación (DMPP)(A); Inhibidores de la ureasa (nBPT o mezclas con nPPT) (B), y ureas de liberación controlada (C). Fuente: Profertil 2020.

Por otro lado, y a diferencia de lo mencionado antes para los inhibidores de la volatilización, en donde es posible predecir, hasta cierto punto, la efectividad de su aplicación conociendo la temperatura del suelo o del aire en el sitio de uso, predecir la respuesta al agregado de inhibidores de la nitrificación es un gran desafío. Esto se debe

a que los eventos de excesos hídricos conducentes a pérdidas de N por desnitrificación o lixiviación de nitratos presentan un patrón mucho más variable y multifactorial. Factores como tipo y textura de suelo, concentración de nitratos, magnitud e intensidad de las lluvias, tipo de cultivo y profundidad de las raíces, método y momento de aplicación de N, entre otros factores, inciden en los fenómenos de lixiviación de nitratos.

Si bien existe cierta moda a hablar de “fertilizantes inteligentes” para referirse a la “nueva generación” de desarrollos de fertilizantes, y hay innovaciones relevantes que se pueden citar, quizás se debería enfatizar más la idea de la “fertilización inteligente” que va mucho más allá del tipo de fuente e incluye en sentido amplio el modelo conceptual de los 4 requisitos del manejo sustentable de nutrientes (4R). Es decir, definir adecuadamente la dosis del nutriente (diagnóstico), la fuente, el momento y la forma de aplicación. Desde este punto de vista, se puede capturar una gran parte de la eficiencia de la fertilización partiendo de un adecuado diagnóstico nutricional y ajustando los métodos y momentos de aplicación de los fertilizantes tradicionales, mientras que los FEM nos aportan nuevas opciones para ir más allá y seguir ganando en eficiencia de uso de los nutrientes y en la mitigación de pérdidas hacia el ambiente (e.g. aguas subterráneas o superficiales, atmósfera).

El mayor agregado de valor de cualquier innovación en nutrición vegetal, incluyendo a los FEM, se logra integrando el uso de las mismas al manejo integrado de nutrientes. Esto implica optimizar el diagnóstico de deficiencias nutricionales y la tecnología de la fertilización en sentido amplio, integrando diversas fuentes de nutrientes, incluyendo el uso de fertilizantes convencionales y también no convencionales como los residuos y efluentes pecuarios estabilizados y/o compostados, enmiendas minerales, aporte de nutrientes de cultivos de servicio, entre otros.

Los FEM son tecnologías que agregan valor para mejorar la productividad de los cultivos y sobre todo mejorar la sustentabilidad en el manejo del agroecosistema, por su capacidad de reducir significativamente las pérdidas de nutrientes fuera del sistema suelo-cultivo, aspecto que se debería considerarse y evaluarse

en la gestión económica y ambiental de las empresas agropecuarias.

6. Bibliografía citada y recomendada

- Burzaco, J.P.; I. A. Ciampitti & T. J. Vyn. 2014. Nitrapyrin impacts on maize yield and nitrogen use efficiency with spring-applied nitrogen: field studies vs. meta-analysis comparison. *Agronomy Journal* 106 (2): 753-760.
- Calabi-Floody, J. Medina, C. Rumpel; L.M. Condrón, M. Hernández, M. Dumont & M. de la Luz Mora. 2018. *Advances in Agronomy*. Vol. 147. Chapter 3. p 119-157.
- Chien S.H., L.I. Prochnow and H. Cantarella. 2009. Recent Developments of Fertilizer Production and Use to Improve Nutrient Efficiency and Minimize Environmental Impacts. *Advances in Agronomy*, Vol 2, 102. Chapter 8 (268-322 p) Elsevier INC.
- Chien, S.H, Edmeades, D; R, McBride & K.L. Sahrawat. 2014. Review of maleic-itaconic acid copolymer purposed as urease inhibitor and phosphorus enhancer in soils. *Agronomy Journal*. Vol 106. Issue 2. p 423-430.
- Drechsel, P; P. Heffer; H. Magen, R. Mikkelsen & D. Wichelns. 2015. Managing water and fertilizers for sustainable agricultural intensification. International Fertilizer Industry Association (IFA). 270 p.
- Herrmann, C. y M. Torres Duggan. 2016. Fertilizantes y enmiendas de origen mineral: caracterización y uso en la Argentina. En: *Suelos y Geología Argentina*. 2016. Una visión integradora desde diferentes campos disciplinarios. Pereyra, F.X, Torres Duggan (editores). Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACS). Asociación Geológica Argentina (AGA). Universidad Nacional de Avellaneda (UNDAV). p 329-355.
- Profertil, 2020. departamento de I&D. Boletines técnicos N° 29 (<https://www.profertil.com.ar/index.php/cereales/maiz-cereales/bt-29-fertilizantes-estabilizados>) y N° 30 (<https://www.profertil.com.ar/wp-content/uploads/2021/06/BT-30-ETP-en-maiz.pdf>)
- Prystupa, P; Torres Duggan, M.; Ferraris, G. 2012. Tecnología de aplicación de micronutrientes en la Región Pampeana argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica (IAH) N°5*. Marzo. 19 p.
- Reetz, H. 2016. Fertilizers and their efficient use. International Fertilizer Industry Association (IFA). 114 p.
- Rodríguez, M.B; M Torres Duggan, I. de Igarzábal & E. Stingl. 2020. *Agronomía & Ambiente*. Revista de la Facultad de Agronomía de la UBA. 40 (2): 122-135
- Rodríguez, M.B. y M. Torres Duggan. 2021. Caracterización de los fertilizantes, enmiendas, abonos y su calidad agronómica. En: *Fertilización de Cultivos y Fertilización en la Región Pampeana*. R. Álvarez (Editor). Editorial Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires (EFA). Capítulo 19 (391-425 p).
- Thapa, R.; Chatterjee, A.; Awale, R.; McGranahan, D. & A. Daigh. 2016. Effect of enhanced efficiency fertilizers on nitrous oxide emissions and crop yields: A meta-analysis. *Soil Science Society of America Journal* 80: 1121-1134.
- Trenkel, M.E. 2010. Slow and controlled release and stabilized fertilizers. An option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. IFA. Paris. 160 pp.
- Torres Duggan, M., Rodríguez, M.B; Lavado, R.S; Melgar, R. 2010. Eficiencia agronómica del azufre elemental relativa a una fuente azufrada soluble en trigo en la Región Pampeana. *Ciencia del Suelo*. 28 (1). 67-77.
- Torres Duggan, M.; Melgar, R.; Rodríguez, M.B.; Lavado, R.S.; Ciampitti, I.A. 2012. Sulfur fertilization in the Argentine Pampas region: a review. *Agronomía & Ambiente*, 32 (1-2) 61-73.
- Torres Duggan, M., M. Tysko; C. Quinteros, M.A. Zamero y M.R. Befani. 2022. Aptitud agronómica de la roca fosfórica de Bahía Inglesa (Chile) en suelos argentinos. En *actas digitales del XXVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (CACS)*. Ciudad de Buenos Aires (Argentina).
- Torres Duggan, M. y M. Tysko. 2022. Fertilización con roca fosfórica de Bahía Inglesa (Chile), en el cultivo de soja en la Pampa Ondulada. En *actas digitales del XXVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (CACS)*. Ciudad de Buenos Aires (Argentina).
- Melgar, R & Torres Duggan, M. 2014. Manual de Fertilizantes Fluidos. Fluid Fertilizer Foundation (FFF). ISBN 978-987-33-5271-3. 184 pp
- Webber, C. & L. McCann. 2015. Adoption of nitrogen-efficiency technologies by U.S. corn farmers. *Journal of Environmental Quality* 44: 391-401.
- Wolt, J. D. 2004. A meta-analysis of nitrapyrin agronomic and environmental effectiveness with emphasis on corn production in the Midwestern USA. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 69: 23-41.
- Zapata, F & RN Roy (Eds). 2004. Use of phosphate rocks for sustainable agriculture. FAO. 127 p.

Estabilizadores de nitrógeno: beneficios agronómicos y ambientales de su utilización en cultivos extensivos

Martín Torres Duggan¹

(1) Tecnoagro; Girardot 1331 (1427) CABA; email: mjjtorresduggan@gmail.com

En contextos difíciles como el actual, con altos precios de los fertilizantes nitrogenados, se debe propender a intensificar el diagnóstico nutricional a través de un correcto muestreo y análisis de suelos como así también considerar todas las innovaciones disponibles que puedan tener optimizar la nutrición de los cultivos. Dentro de estas tecnologías, los estabilizadores de nitrógeno juegan un rol relevante pudiendo mejorar tanto la productividad de los cultivos, como así también mitigar el impacto ambiental de la fertilización nitrogenada. El objetivo de este artículo es caracterizar los principales estabilizadores de nitrógeno y su funcionamiento en el sistema suelo-cultivo. La información presentada en este documento se base en una versión actualizada y ampliada de la conferencia “Nitrogen stabilizers for field crops in Latin America: the use of urease and nitrification inhibidores and market prospects” realizada por el autor en el Fertilizer Latino Americano Conference del 2018 en San Pablo (Brasil).

Lo primero es lo primero: ¡¡más y mejor diagnóstico de fertilidad!!

Si bien el propósito de este artículo es describir el impacto agronómico y los beneficios ambientales del uso de estabilizadores de nitrógeno (N), debemos resaltar que, en cualquier contexto, el primer paso a considerar es realizar un diagnóstico integral de la fertilidad de suelos (Figura 1).

El principal mensaje que pretende transmitir el esquema de la Figura 1 es que, como agrónomos, debemos sacar provecho de todas las herramientas disponibles para evaluar la condición de fertilidad de los lotes y la situación nutricional de los cultivos. Esto incluye herramientas “tradicionales” de alto impacto, bajo costo y alto agregado de valor como la observación del perfil del suelo (el costo es tener tiempo, saber de suelos y tener a mano una pala afilada), el correcto muestreo y análisis de suelos (cuya incidencia es de 2-3 USD/ha), entre otras. Este aspecto no es menor teniendo en cuenta que solo el 20% de los productores de maíz realizan muestreo de suelos frecuentes, en otras palabras, la mayor parte fertiliza sin ningún diagnóstico nutricional.

Dentro del diagnóstico tradicional, se recomienda especialmente evaluar no solo el contenido de nitratos en el suelo en el momento de la siembra (0-60 cm), sino también la posible influencia de los cultivos antecesores (ya sean de cosecha o de servicio), ya sea aportando o inmovilizando N. Asimismo, actualmente se dispone del Nan (N incubado anaeróbico), que se mide en la capa superficial del suelo (0-20 cm) permitiendo estimar el N potencialmente mineralizable durante el ciclo del cultivo. Así, la integración del N asimilable inicial sumado al Nan es posible tener una mucho mejor estimación de la oferta de N que explorará el cultivo, aspecto de gran importancia considerando la elevada variabilidad de la oferta de N entre lotes de un mismo predio o bien entre años en el mismo lote. Partiendo de un profundo conocimiento de la oferta de N disponible en el suelo en el momento de la siembra, del N mineralizable, posteriormente se puede evaluar el estatus de nutrición nitrogenada mediante evaluaciones del canopeo. Estas evaluaciones que se pueden hacer en V7-8 de maíz permiten decidir una eventual refertilización a partir de V10, aspecto especialmente útil en maíces tempranos en donde se dispone de una ventana logística más amplia para realizar fertilizaciones en estadios vegetativos.

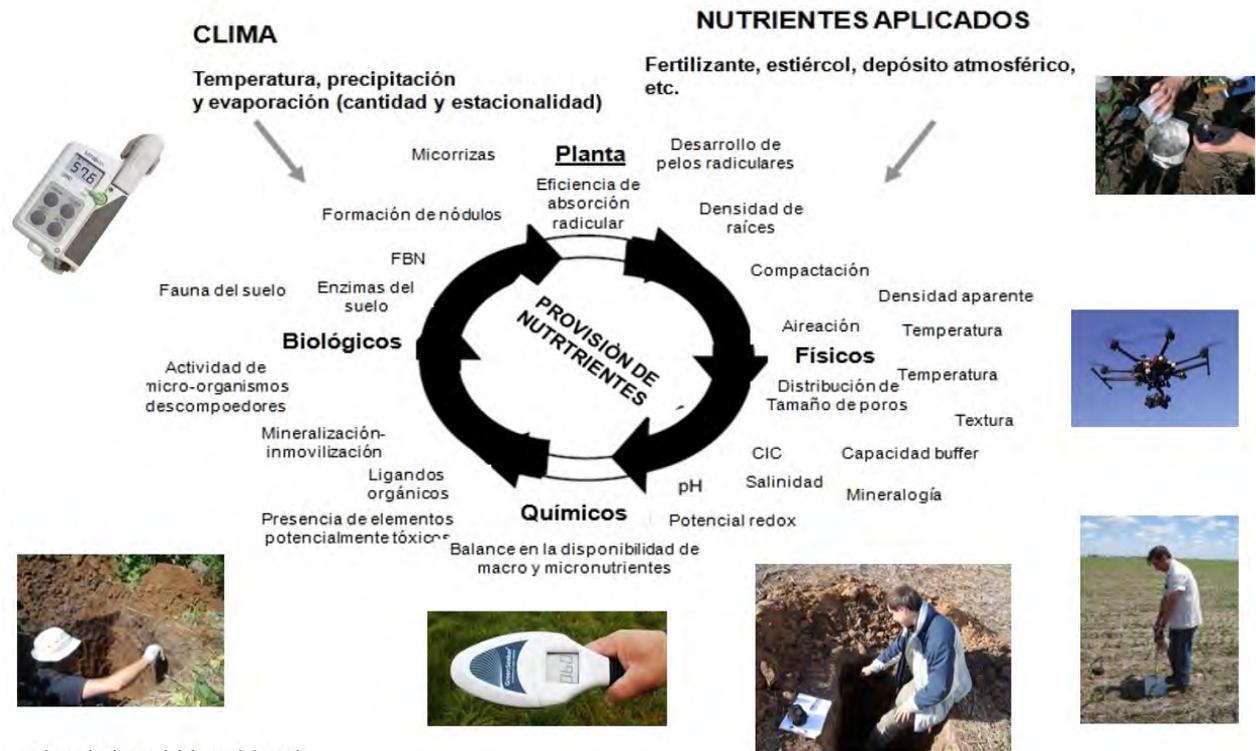


Figura 1. Herramientas tradicionales y de precisión que se deben considerar para el diagnóstico integral de las deficiencias nutricionales.

1. ¿Qué son los fertilizantes de eficiencia mejorada y los estabilizadores de nitrógeno?

De acuerdo con la definición propuesta por la AAPFCO en EE. UU, se considera como “fertilizante de eficiencia mejorada (FEF acrónimo en español), como aquellos fertilizantes con características que permiten un incremento en la absorción de nutrientes por parte de las plantas y reducen el potencial de pérdidas al ambiente, en comparación con productos de referencia. Asimismo, los inhibidores de la ureasa o de la nitrificación, se los suele denominar como “estabilizadores del N”, ya que permiten mantener el N en forma de urea o de amonio, respectivamente, minimizando las pérdidas de N por volatilización de amoníaco (en el caso de los inhibidores de la ureasa o IU) por lixiviación de nitratos y/o desnitrificación (cuando se aplican inhibidores de la nitrificación o IN).

2. ¿Cuáles son los beneficios de los inhibidores de la nitrificación y cuál es su posicionamiento agronómico dentro del manejo nutricional de los cultivos?

2.1. Beneficios generales

Los principales beneficios del uso de inhibidores de la nitrificación (IN) derivan de la demora del proceso de nitrificación durante un tiempo variable, que depende del tipo de inhibidor y condiciones ambientales, en especial de la temperatura. La estabilización del N forma amoniacal permite reducir las pérdidas por lixiviación de nitratos y desnitrificación. En condiciones predisponentes para la ocurrencia de estas pérdidas de N, la reducción de las mismas, como así también a posible contribución de otros mecanismos fisiológicos asociados con nutrición amoniacal, explicarían los aumentos en el rendimiento derivados de la aplicación de los IN.

Uno de los desafíos del manejo de los IN deriva del hecho que el proceso de lixiviación de nitratos está regulado por un gran número de factores, siendo difícil de predecir (Figura 2).

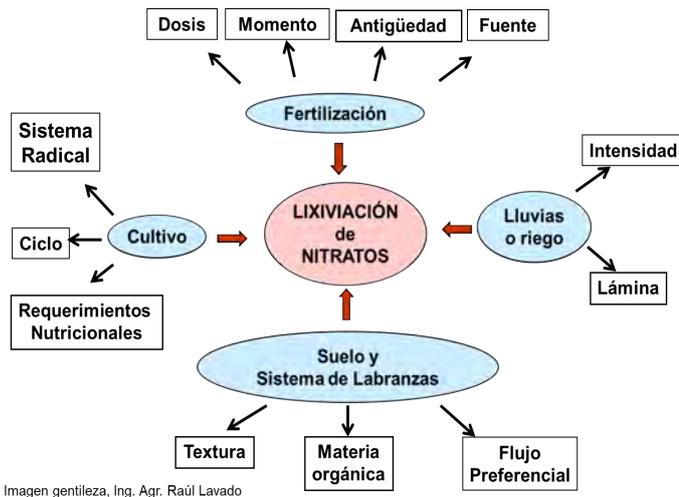


Imagen gentileza, Ing. Agr. Raúl Lavado

Figura 2. Factores que inciden en el proceso de lixiviación de nitratos.

La posibilidad de contar con modelos de predicción de excesos hídricos es una herramienta interesante que permitiría ayudar al agricultor en la toma de decisiones en cuanto a la aplicación de IN, este tipo de modelos se utilizan en EE.UU. De lo contrario, los IN se los suele utilizar como “seguros” ante el riesgo de sufrir pérdidas de N por lixiviación, cuya relevancia es mayor cuanto mayor es la dosis de N aplicada (mayor desembolso económico), y mayor es la probabilidad de ocurrencia de fenómenos de lavado de nitratos y desnitrificación.

Dentro de los mecanismos fisiológicos que se han descrito para los IN, en algunos trabajos se ha comprobado el beneficio de la nutrición amoniacal a nivel de la absorción radicular debido a la reducción de los costos energéticos derivados de la asimilación del N en forma de amonio, sin el paso metabólico usual que requiere de la reducción de los nitratos a amonio. Por otro lado, cuando las plantas absorben amonio, para mantener el balance electrónico, eliminan iones hidrógeno (protones), acidificando la rizosfera, proceso que aumentaría la biodisponibilidad de P y algunos micronutrientes. A veces estos estudios se realizan en condiciones controladas (e.g. ensayos en maceta) y no siempre han sido validados en condiciones extensivas de producción (i.e. a campo).

2.2. Efectos del agregado de inhibidores de la nitrificación sobre el rendimiento y mitigación de gases de efecto invernadero

En los últimos años se han realizado numerosas revisiones y meta-análisis sobre IN

en revistas científicas con referato. Estos estudios muestran que los efectos sobre el rendimiento son poco consistentes y la ocurrencia de aumentos en la productividad (biomasa de grano) depende principalmente de la incidencia de pérdidas de N por lixiviación/desnitrificación. Estos resultados resultan lógicos teniendo en cuenta que el principal mecanismo de acción de los IN es la estabilización del N amoniacal aportado por el fertilizante aplicado.

Por otro lado, la evidencia experimental muestra que, en términos generales, la aplicación de IN luego reduce marcadamente las emisiones de N (N_2O y de NO) medidas luego de la fertilización nitrogenada, y esto se manifiesta en la mayor parte de los experimentos. La Figura 3 muestra una síntesis de resultados de un meta-análisis realizado a nivel global a partir de 62 artículos científicos con referato con 859 sets de datos alrededor del mundo. Este trabajo incluye además un análisis económico del uso de IN, valorando tanto los efectos sobre el rendimiento, sino también del derivado de la mitigación de las pérdidas de N.

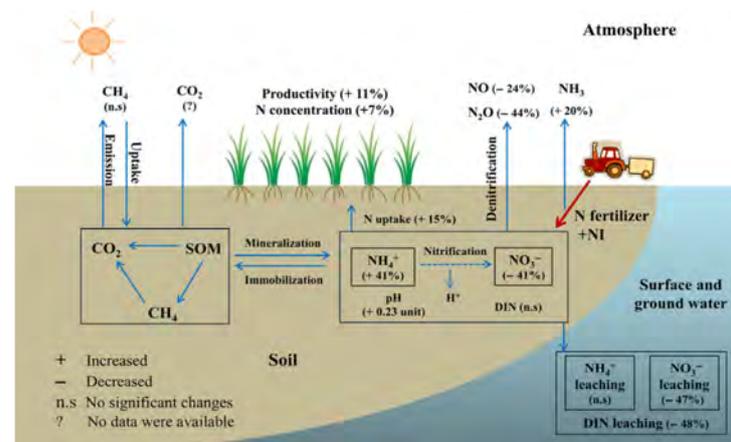


Figura 3. Cuantificación de los efectos del agregado de inhibidores de la nitrificación en el sistema suelo-cultivo. Fuente: Qiao et al. (2015)

Como se puede apreciar, el incremento medio de la productividad de diferentes cultivos fue del 11% y reduciendo marcadamente las pérdidas de N por lixiviación de nitratos y desnitrificación. Dentro de los cuatro principales cultivos analizados, la cebada mostró el mayor aumento de la productividad (media=17%, mínimo 7%; máximo=29%), en relación con trigo (media=2%, mínimo=0; máximo 5%), maíz (media=9%, mínimo 3%, máximo 17%) y arroz (media=7%, mínimo 3%, máximo 12%).

Asimismo, estos trabajos muestran que el agregado de IN aumenta marcadamente la absorción de N y la eficiencia de recuperación aparente del N (ERN).

En otro meta-análisis publicado por Thapa et al. (2016) donde evaluaron 43 trabajos de investigación (246 observaciones) detectaron un incremento medio del 7,1% ($IC_{95\%}=4,7-9,5\%$) analizando en forma conjunta los datos de los diferentes cereales estudiados (trigo, maíz y arroz). En maíz el aumento del rendimiento no fue significativo, mientras que, para trigo y arroz, los incrementos medios fueron de 7,2 y 5,5%, respectivamente. Sin embargo, la mayor capacidad de mitigación de emisiones de N se detectó en maíz, en donde el agregado de IN redujo el 51% las emisiones de N_2O , considerablemente mayor a la magnitud observada en trigo o arroz (-30 y -27%, respectivamente). (Figura 4).

Independientemente de la influencia que tienen factores edáficos como la textura o la reacción del suelo sobre la performance agronómica de los IN, en general los efectos que se observan sobre el rendimiento en grano son moderados, con respuestas medias máximas del 10%.

En otro estudio realizado por Wolt (2004) analizando un gran número de resultados

experimentales de utilización de Nitrapyrin en el Medio Oeste de EE. UU, aproximadamente en el 25% de los casos no se han detectado efectos significativos sobre el rendimiento, existiendo así un 75% de probabilidad de obtener aumentos del rendimiento del 7% por el agregado de Nitrapyrin. Otros resultados promisorios fueron el aumento en la retención de N en biomasa (+28%), reducción de pérdidas por lixiviación de nitratos (-16%), disminución de emisiones de N (-51%).

En otra investigación llevada a cabo por Burzaco et al. (2014), donde se comparó la efectividad del Nitrapyrin (Instinct®) en aplicaciones conjuntas con UAN y/o N anhidro en maíz en Indiana y Nebraska (EE. UU) tanto en experimentos a campo como a través de un meta-análisis, observaron impactos significativos en la eficiencia de utilización de N del maíz. Así, los autores reportaron mejoras en la eficiencia de uso del N (EUN) y en la eficiencia de recuperación aparente de N (ERN) de ~17 y ~25%, respectivamente, cuando el IN se aplicó en primavera. Sin embargo, no se detectaron efectos significativos del IN sobre la biomasa de grano de maíz en los experimentos a campo, mientras que en el meta-análisis observaron un leve aumento en el rendimiento (+ 116 kg ha^{-1} ; $p=0,09$).

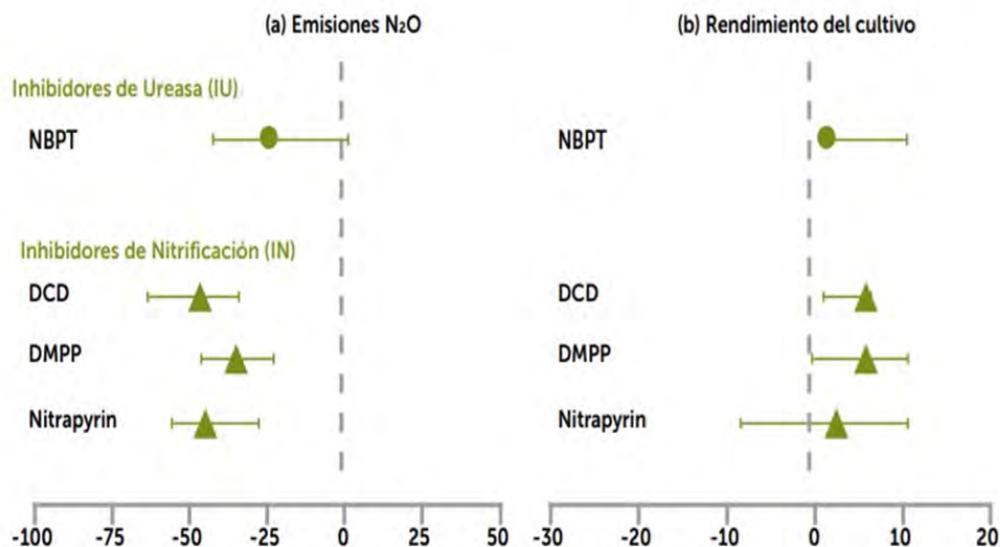


Figura 4. Influencia del agregado de inhibidores de ureasa y de la nitrificación sobre las emisiones de óxido nitroso (a) y el rendimiento de distintos cultivos (b). Fuente: Thapa et al. (2016). Nota: se utilizó la versión en español de la figura que fue incluida en el Boletín N° 29 elaborado por el área de I&D de Profertil (agosto de 2020).

2.3. ¿Cómo puede impactar la lixiviación de nitratos sobre la dinámica de utilización de N de los cultivos y la respuesta al agregado de inhibidores de la nitrificación?

En la porción húmeda de la Región Pampeana y en maíces de siembra temprana, la mayor incidencia de la lixiviación de nitratos se presenta cuando el N es aplicado en el momento de siembra o pre-siembra, debido a que el N queda en el suelo susceptible a ser lixiviado, existiendo por consiguiente un desfase entre la oferta y demanda de N. Por ello, en maíces de siembra temprana, la eficiencia de la fertilización nitrogenada a la siembra suele ser menor que la realizada en post-emergencia (e.g. V4-6), sobre todo cuando se presentan lluvias intensas y balances hidrológicos positivos durante los estadios tempranos del ciclo de maíz.

Considerando que, en términos generales, los productores prefieren fertilizar con N en el momento de pre-siembra o en la siembra del cultivo, aun sabiendo que se logran mayores EUN en aplicaciones en post-emergencia o divididas entre el momento de siembra y post-emergencia, el agregado de IN junto con la fertilización a la siembra, permitiría incrementar la EUN (mitigando las pérdidas por lixiviación). Esto produce un beneficio económico debido al incremento del rendimiento asociado a una mayor disponibilidad de N asimilable. Haciendo una analogía con las preferencias de los productores del Medio Oeste de EE. UU por la aplicación del N en el otoño en relación a la primavera o hacerlo en el momento de la siembra en vez de en post-emergencia (side-dress) en aquellos agricultores que fertilizan con N en la primavera; se puede plantear este análisis para la Región Pampeana argentina. Así, se debería considerar las ventajas logísticas y agronómicas principalmente (pero no exclusivamente) que pueden generar el uso de IN en planteos de siembra temprana de maíz, donde existen mayores probabilidades de ocurrencia de pérdidas de N por lixiviación. En estas condiciones, los beneficios pueden venir del ahorro en una segunda aplicación de N, en una mayor EUN o bien en una combinación de efectos.

Para las condiciones de la Región Pampeana, y de acuerdo con ensayos exploratorios de evaluación agronómica del Nitrapyrin (Instinct HL®; Corteva Agriscience; datos no publicados) realizados por investigadores de INTA, Universidades y/o consultores referentes, se observaron efectos variables de la aplicación del IN sobre el rendimiento de maíz dependiendo de

la fecha de siembra (temprana o tardía), y condiciones de sitio (e.g. oferta de N y condición hidrológica). Las respuestas detectadas fueron mayores en maíces tempranos que tardíos y variables según la condición del sitio. La mayor respuesta en fechas de siembra temprana se relaciona con la mayor incidencia de pérdidas de N por lixiviación de nitratos en estadios tempranos del ciclo de maíz, como así también en la menor disponibilidad de N inicial en el suelo en el momento de la siembra. Por el contrario, en siembras tardías, el contenido de N asimilable en el momento de la siembra y el N mineralizable es mayor (i.e. mayor oferta relativa de N), como así también es mayor la sincronía entre la oferta de N y la demanda del cultivo. Asimismo, en maíces de fecha de siembra tardía de la Pampa Ondulada suele ser menor la incidencia de fenómenos de lixiviación. Esto se debe a que el cultivo progresa muy rápido en su desarrollo fenológico, determinando un rápido acceso al agua disponible en el suelo, generando frentes de secado alrededor de las raíces. Por consiguiente, aun ocurriendo precipitaciones intensas, debido a la mayor demanda atmosférica y al frente de secado que ocurre en el ambiente radicular y que progresa en profundidad, mantiene el suelo con niveles de humedad por debajo de capacidad de campo, reduciendo la probabilidad que se generen balances hídricos positivos y consecuentemente lixiviación de nitratos.

A los fines de modelizar los antecedentes experimentales mencionados previamente de evaluación agronómica del Nitrapyrin (Instinct HL®) en maíz en la Región Pampeana, se presenta en la Figura 5 el beneficio marginal derivado de la aplicación de este IN en un ejemplo de aplicación de UAN según diferentes escenarios de fecha de siembra y respuestas.

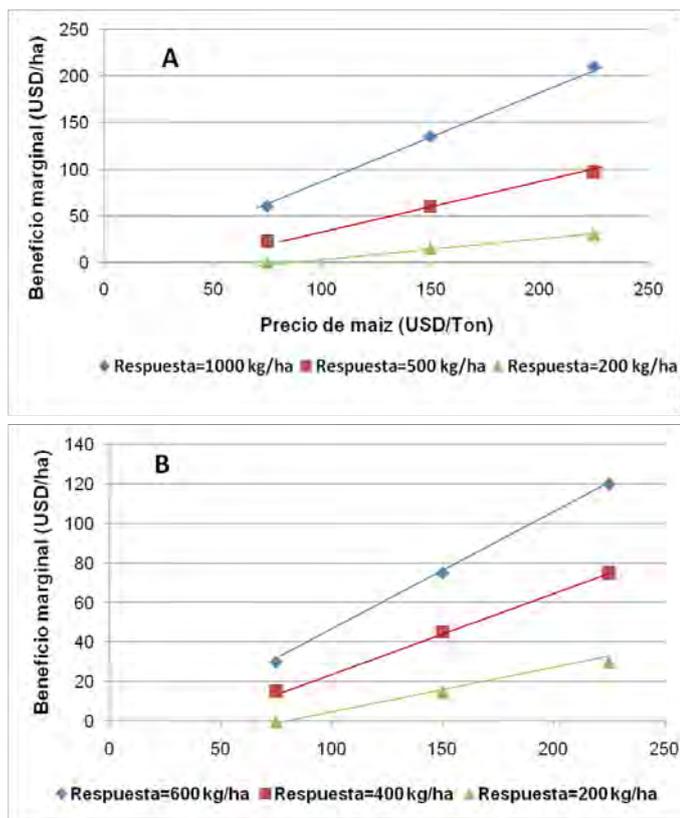


Figura 5. Beneficio marginal (Ingreso marginal-costo marginal) de la aplicación de UAN con Instinct HL® en función del precio del maíz y diferentes escenarios de respuesta en maíces tempranos (A) y tardíos (B). Costo del IN ~15 USD ha⁻¹. Datos basados en información provista por Corteva Agriscience.

Como se puede apreciar en la Figura 5, cuanto mayor es el precio del maíz y/o mayor la respuesta esperada al agregado del IN, mayor es el beneficio marginal, asumiendo en este caso que no hay gastos adicionales por la aplicación del IN ya que éste de lo agregó junto al UAN en la misma operación de fertilización.

Los escenarios planteados en la Figura 5 se basan en los siguientes supuestos:

1. Dosis de aplicación de N moderadas en el rango de 70-100 kg de N ha⁻¹ en maíces tempranos y una oferta de N en el suelo a la siembra de ~60 kg ha⁻¹
2. Dosis de aplicación de N moderadas en el rango de 70-90 kg de N ha⁻¹ en maíces tardíos y una disponibilidad de N de ~80 kg ha⁻¹.
3. Los contenidos de N en el suelo en el momento de la siembra indicados para maíces tardíos y/o tempranos representan valores medios esperables en los suelos de la porción húmeda de la Región Pampeana

Cabe resaltar que los escenarios planteados son conservadores. En el actual contexto de precios internacionales elevados de los fertilizantes nitrogenados (noviembre de 2021), la incidencia del costo de los estabilizadores de N en el total de gastos directos de la fertilización es considerablemente menor. Por otro lado, este modelo conceptual general de beneficio marginal no consideró eventuales reducciones de dosis de N derivados del uso de IN. Este tipo de decisiones podrían ser viables principalmente en planteos de fertilización con alta dosis de N (e.g. maíz bajo riego o en secano de alta productividad). Tampoco se consideró ningún beneficio económico derivado de la mitigación ambiental (e.g. reducción de emisiones de GEI, secuestro de C, etc.).

Un caso interesante a considerar en términos del beneficio del uso de IN son los sistemas de producción de maíz en la Región Semiárida Pampeana, donde predominan suelos muy arenosos (e.g. San Luis, La Pampa, algunas zonas de Córdoba), que presentan consiguientemente mayor riesgo de lixiviación de nitratos. Así, se ha observado bajo riego la fertilización nitrogenada realizada en el momento de la siembra es menos eficiente que la aplicada en post-emergencia, con pérdidas de hasta el 50% del N aplicado en el momento de la siembra (Juan Cruz Colazo, INTA San Luis, comunicación personal). Esta magnitud de pérdida también se podría esperar en planteos de secano cuando se presentan años húmedos (i.e. El Niño) o eventos de precipitación intensa.

2.4. ¿Cómo puede incidir la desnitrificación asociada a excesos hídricos?

Las pérdidas de N por desnitrificación se manifiestan cuando ocurren condiciones de saturación en los agregados del suelo (más del 60% del volumen de poros saturado), donde bacterias anaeróbicas facultativas utilizan los nitratos como aceptor final de electrones, y el carbono de la MO como fuente de energía.

La tasa de pérdida de N₂O (óxido nitroso) depende principalmente de la concentración de nitratos (por ello es mayor cuanto mayor es el contenido de N mineral en el suelo o la dosis de N aplicada) y de la condición de saturación, aunque también está regulado por la temperatura como todo proceso bioquímico. En maíz temprano se puede considerar que máximo de pérdida se puede alcanzar 5% del N aplicado (Álvarez et al. 2015). Sin embargo, hay muy pocos estudios regionales y/o subregionales al respecto, y la mayor parte de ellos se enmarcan en proyectos de GEI (gases de

efecto invernadero), atendiendo principalmente a problemáticas ambientales.

Un aspecto a destacar es que las pérdidas por desnitrificación son mayores en siembra directa que en sistemas con labranza, aumentando también en suelos compactados. Las dos condiciones son prevalentes en la Región Pampeana: la mayor parte de la superficie de maíz se hace en siembra directa y la compactación se ha convertido en una problemática extendida en gran parte de la Pampa Ondulada y Plana tanto en áreas de secano como bajo riego (Torres Duggan et al. 2017; Álvarez et al. 2021). En esta región se cultiva una parte significativa del maíz de secano y regado en forma complementaria de la Región Pampeana.

2.5. Los excesos hídricos en suelos de la Región Chaco-Pampeana en contextos de cambio climático

En las últimas décadas se viene observando un aumento significativo en la frecuencia de ocurrencia de eventos climáticos extremos (Grimm et al. 2000; Podesta et al. 2009), principalmente un aumento de la frecuencia e intensidad de eventos de precipitación intensa (Magrin et al. 2014). Desde la perspectiva del uso de FEF en general y del uso de IN en particular, el incremento de la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos de precipitación, como así también del riesgo de anegamiento, representa una oportunidad para posicionar este tipo de tecnologías. En la Figura 6 se muestra la distribución de suelos con riesgo potencial de anegamiento.

A los factores geomorfológicos y edafoclimáticos que inciden sobre el riesgo de anegamientos, se suma en los últimos años, el ascenso de la profundidad freática en gran parte de la Región Pampeana, aumentando tanto el riesgo de anegamiento, como de inundaciones. La aplicación de IN en el cultivo de maíz en ambientes vulnerables de ser afectados por fenómenos de anegamiento en estadios tempranos del ciclo podría servir como “seguro” para minimizar las pérdidas de N por lixiviación y desnitrificación.

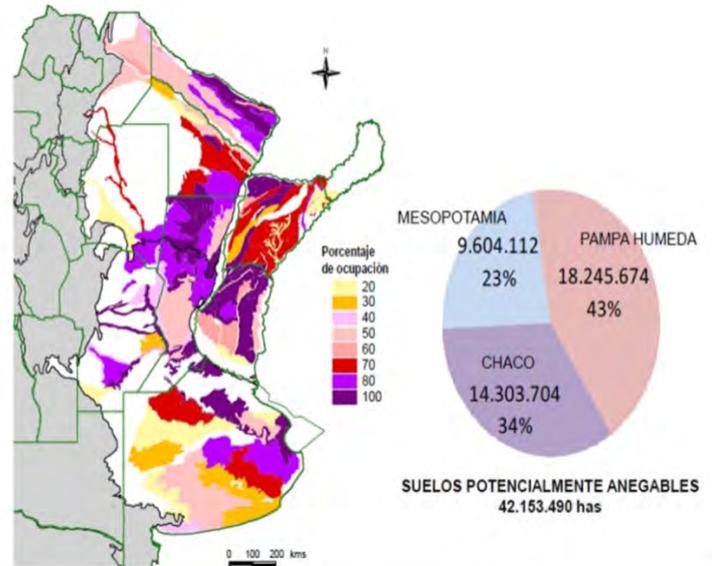


Figura 6. Distribución de suelos con riesgo potencial de anegamiento. Fuente: INTA Castelar. Gentileza Miguel A. Taboada.

2.6. ¿Qué inhibidores de la nitrificación se utilizan en el mercado local, regional e internacional?

En la actualidad no se disponen de estadísticas de consumo públicas y confiables en este segmento de productos, en parte debido al limitado número de productores de estos estabilizadores de N a escala global. Los IN más importantes en términos de volumen y también en términos de historia de uso son el DCD (desarrollado por Showa Denko y con licencias en diversas empresas y formulaciones en EE. UU, Canadá, Europa y Asia) y el Nitrapyrin (patentado por Dow AgroSciences en 1974 y comercializado desde entonces con la marca N-Serve®. Más del 90% del Nitrapyrin se aplica en maíz, aunque el producto está registrado también para otros cultivos de grano como trigo o sorgo.

En el 2010 Dow AgroSciences (actualmente Corteva Agriscience) lanzó al mercado una nueva formulación microgranulada de Nitrapyrin comercializada con diferentes marcas tanto en EE. UU y Canadá (Instinct®), como así también en otras regiones como Unión Europea, Australia y China (N-Lock®; eNTrench®). Esta nueva formulación (suspensión concentrada), actualmente comercializada por Corteva AgriScience, tiene varias ventajas en relación a la clásica formulación líquida (N-Serve®), como la menor volatilidad del ingrediente activo luego de la aplicación en el suelo, la mayor miscibilidad con fertilizantes líquidos, como así también la posibilidad utilizar el IN en tratamientos de

impregnación de fertilizantes granulados (Tabla 1).

Tabla 1. Principales características de los principales inhibidores utilizados a escala comercial en el cultivo de maíz.

Nombre	Solubilidad en agua (g L ⁻¹)	Volatilidad relativa	Modo de aplicación
Nitrapyrin (N-Serve)	0,04 (20°C)	Alta	Adecuado para su aplicación junto con N anhidro
Nitrapyrin (Instinct HL)	Miscible	Variable (*)	Apto para mezcla con fertilizantes nitrogenados líquidos y sólidos (**) e impregnación de fertilizantes granulados
DCD	23,0 (13°C)	Baja	Apto para su mezcla con urea u otros fertilizantes nitrogenados
DMPP	-	Baja	Apto para su mezcla con urea u otros fertilizantes nitrogenados

Fuente: Ampliado y adaptado de Trenkel (2010) y Webber y McCann (2016). (*). Protección contra la volatilización del ingrediente activo durante 10 días post-aplicación (luego se requiere incorporación por 10-15 mm de lluvia o riego o mezclado mecánico). (**). Se puede requerir el agregado de compuestos para mejorar su miscibilidad.

En cuanto a nuevos desarrollos de IN, se destaca el DMPP (BASF) lanzado al mercado hace algunos años. Se evidencia cierto “optimismo” en relación a este nuevo lanzamiento y se lo está evaluando extensivamente a nivel de investigación, tanto desde el punto de vista agronómico, como así también de sus posibles riesgos ecotoxicológicos. Hasta la fecha no se han detectado problemas en este último sentido, aunque tampoco se dispone de información que permita asegurar su superioridad respecto a los otros inhibidores de amplio uso como el DCD o Nitrapyrin. Posiblemente el mayor “optimismo” en relación al DCD provenga del hecho que éste último fue prohibido recientemente en Nueva Zelanda por haberse detectado residuos en la leche, que habrían derivado de la aplicación del inhibidor en pasturas (Thapa et al. 2016).

Por otro lado, en los últimos años (2020 y 2021), Koch Agronomic Services lanzó a nivel global una nueva generación de IN (ingrediente activo Duromide) e IU (ingrediente activo Pronitridine) que fueron patentados y muestran una eficiencia agronómica relativa superior a los inhibidores clásicos utilizados como referencia (e.g. nBPT, DCD). Las nuevas moléculas utilizadas en estas innovaciones, en general, aumentan la estabilidad de la formulación tanto en condiciones de almacenamiento y/o en el suelo (i.e. menor degradación), aumentando la ventana de protección en relación a los inhibidores de referencia.

En los últimos años en Brasil se ha evaluado activamente a nivel experimental el DCD y existe un marcado interés comercial en posicionar el DMPP. Sin embargo, debido a que en ese país los productores usualmente realizan aplicaciones

divididas de N, logran sostener adecuados niveles de EUN aun utilizando fuentes de N convencionales, limitando las posibilidades comerciales para el desarrollo de estabilizadores de N.

En Uruguay se han observado respuestas muy atractivas al uso de inhibidores de la nitrificación en trigo aplicados mediante formulaciones líquidas en el cultivo de trigo en la región del Litoral asociadas a la reducción de pérdidas de lixiviación de nitratos y el subsiguiente incremento en la recuperación y EUN. Asimismo, algunas empresas proveedoras de fertilizantes líquidos que operan en este país están comenzando a ofrecer formulaciones que incluyen estabilizadores de N.

3. ¿Cuáles son los beneficios de los inhibidores de la ureasa y cuál es su posicionamiento agronómico dentro del manejo nutricional de los cultivos?

3.1. Impacto sobre el rendimiento

El uso de IU ha sido extensamente evaluado en la Argentina y en Uruguay, especialmente en el cultivo de maíz. Las respuestas observadas variaron entre 300 y 1500 kg/ha (mediana de 500-600 kg/ha). Las mayores respuestas se suelen dar, en términos generales, cuando las pérdidas de N por volatilización determinan una reducción de la oferta de N al cultivo. Las respuestas medias suelen ser consistentes en un amplio rango de condiciones edafoclimáticas.

La magnitud de las pérdidas por volatilización de amoníaco suele estar muy asociadas con las temperaturas del suelo (o del aire) imperantes

durante la fertilización, y eso permite, predecir en qué condiciones productivas (e.g. latitud y longitud) se puede esperar una mayor o menor capacidad de reducción de las emisiones de amoníaco cuando se aplica urea al voleo. Así, estudios experimentales realizados en la Región Pampeana muestran que las pérdidas de N por volatilización de amoníaco pueden ser muy variables, desde 0 hasta 30% del N aplicado en planteos de siembras temprana de maíz (i.e. septiembre-octubre en Zona Núcleo) y hasta 40% del N aplicado se aplica urea al voleo en fertilizaciones de maíz tardío (i.e. diciembre).

3.2. Mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero y secuestro de carbono

La capacidad que tienen los IU de aumentar los rendimientos de los cultivos y reducir las emisiones de amoníaco presentan no solo un beneficio agronómico directo (mayor rendimiento y rentabilidad) sino también implicancias ambientales muy relevantes en términos de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Un ejemplo de esos efectos surge de un estudio realizado por el área de I&R a través de 90 experimentos de campo en maíz durante 12 años (campañas 200/09 al 2019/20) en 47 localidades de la Argentina (Figura 7).

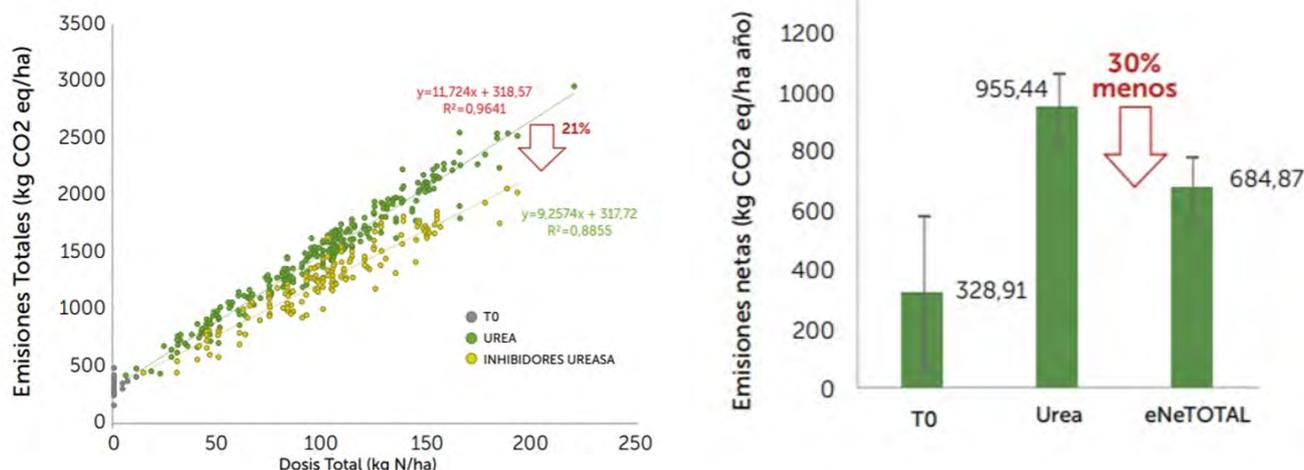


Figura 7. Emisiones de GEI totales (izquierda) y netas (derecha) en kg CO₂ eq./ha año con urea sin tratar y tratadas con IU. diferentes fuentes de N Fuente: Boletín n°30 del área de I&D de Profertil (junio de 2021).

En estos ensayos, en donde se observó una respuesta positiva en el 67% de los ensayos y un aumento de rendimiento promedio de 640 kg/ha, se redujo en 21% y 30% las emisiones totales y netas de GEI, expresadas en términos de eq. CO₂/ha año. Asimismo, en base al uso de modelos como el Roth C y el AMG se pudo simular que los tratamientos que incluyeron el IU, debido a las mejoras en los rendimientos, aumentaron el secuestro de C del suelo.

Debido a la relevancia creciente que tiene el secuestro de C como estrategia de mitigación del cambio climático, la utilización de estabilizadores

de N se los debe considerar no solo como tecnologías que mejoran o pueden mejorar la productividad (“tecnologías de insumo”), sino también como ecoinnovaciones, es decir como herramientas para mejorar los stocks de C del suelo. Posiblemente en el futuro cercano estas tecnologías tengan mayor adopción a medida que se vayan considerando en las certificaciones ambientales internacionales para otorgar créditos de C asociadas con el manejo de sistemas productivos en el marco de una agricultura intensificada sustentable.

3.3. ¿Qué inhibidores de la ureasa se utilizan a nivel nacional e internacional?

El principal inhibidor de la ureasa (IU) utilizado en cultivos extensivos como maíz y trigo, es el nBPT (Agrotain®, Koch Agronomic Services). Este

estabilizador se comercializa licenciado por varias empresas de fertilizantes alrededor del mundo, tanto en forma individual, como en combinación con el inhibidor de la nitrificación DCD (e.g. Agrotain Plus®) (Synder, 2016; Trenkel, 2010). En

Argentina el nBPT se lo utiliza como tratamiento de “estabilización” de urea granulada, y hay varias empresas que lo comercializan bajo

diferentes formulaciones y marcas (e.g. Limus® tecnología patentada) (Tabla 2).

Tabla 2. Principales tipos de inhibidores de la ureasa (IU) utilizados en Argentina.

Nombre	Usos y características
INHIBIDORES DE LA UREASA	
Agrotain® (NBPT)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Producido por Koch Agronomic Services (USA) quien comercializa el inhibidor bajo licencia a todo el mundo ✓ Protegen de las pérdidas por volatilización en un rango de 10-15 días desde la aplicación, dependiendo de las condiciones edafoclimáticas (luego requiere incorporación por lluvia o riego mayor a 10-15 mm) ✓ Respuestas en rendimiento entre 300 y 1500 kg/ha según condición ambiental y de manejo
Limus®	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Combina a dos inhibidores de la ureasa (NBPT+NPPT), tiene similar comportamiento agronómico aunque un mejor comportamiento y estabilidad en el almacenamiento

Por otro lado, como se mencionó antes, Koch Agronomic Services lanzó en el 202 y 2021 a nivel internacional una nueva generación de IU (ingrediente activo Duromide) que presenta mayor estabilidad y eficacia que el nBPT, como así también amplía la ventana de protección tanto en urea como UAN (Ruffo, 2020, Fertilizer Latino Americano Conference). Debido a lo reciente de estas tecnologías patentadas, es aún limitada la información científica (artículos con referato) disponibles. Tampoco se dispone de información pública de evaluaciones en la Argentina. Sin embargo, esto es habitual, cuando se patentan innovaciones como estas, lleva varios años su evaluación experimental independiente. Hasta la fecha se ha publicado un artículo científico con revisión de pares (Revista Brasileira de Ciencia do Solo). En esta investigación se observó mayor eficiencia en reducir las emisiones de amoníaco del Duromide (IV) en relación al nBPT en el cultivo de maíz. Se comparte el link para acceder a la publicación: <https://www.rbcjournal.org/pt-br/article/duromide-increase-nbpt-efficiency-in-reducing-ammonia-volatilization-loss-from-urea/>

4. Conclusiones y prospectiva tecnológica relacionada con el uso de estabilizadores de nitrógeno

Los estabilizadores de N, al igual que cualquier innovación tecnológica con impacto en la

nutrición nitrogenada de los cultivos debe ser analizada en el contexto del sistema de producción (i.e. agroecosistema). Ello implica partir de un diagnóstico integral de la condición de fertilidad, considerando herramientas “tradicionales” con alto valor agregado y mínimo costo (e.g. muestreo y análisis de suelos, observación de la estructura y morfología del perfil, entre otros) y “nuevas herramientas” como son el sensoramiento remoto y proximal para evaluar el estatus nutricional de los cultivos (e.g. imágenes satelitales).

El posicionamiento agronómico varía según el tipo de estabilizador de N considerado. Así, ya modo de corolario de la información presentada en este artículo, los inhibidores de la nitrificación (IN), son tecnologías que permiten mitigar las pérdidas de N por lixiviación de nitratos y las emisiones de GEI (sobre todo de óxido nitroso). Por ello los IN se los debería considerar en situaciones en donde existen mayores probabilidades de ocurrencia de fenómenos de excesos hídricos, que suelen tener prevalencia en planteos de maíz de fecha temprana, aunque no exclusivamente. Los efectos del agregado de los IN suelen ser consistentes en términos de la reducción de las emisiones de GEI, y presentan un efecto variable sobre el rendimiento, que tiende a ser en general más bien moderado o nulo, dependiendo de la dinámica del N en el sistema suelo-cultivo y la condición hidrológica.

Por otro lado, los inhibidores de la ureasa (IU), mitigan significativamente las emisiones de

amoníaco, con eficacias variables según el tipo de IU utilizado y la condición de sitio, sobre todo temperatura y características de fertilidad del suelo (e.g. pH, textura, MO, entre otros). La extensa información experimental disponible en maíz en la Región Pampeana indica que son esperables aumentos significativos y rentables derivados de la aplicación de IU (e.g. nBPT) con respuestas medias de 640 kg/ha y una frecuencia de respuesta positiva del 67% (I & D, Profertil). Asimismo, el costo de este tipo de tecnologías (~14 USD/ha para una dosis de 200 kg/ha de urea) tiene muy baja incidencia en el presupuesto de fertilización nitrogenada y permite capturar una elevada respuesta con impacto directo en el beneficio económico del cultivo.

En Argentina si bien la industria local de fertilizantes viene priorizando el posicionamiento de IU por sobre los IN en el segmento de cultivos extensivos, esta tendencia contrasta con mercados de países desarrollados como EE. UU, Australia, UK, entre otros, en donde, en general, desde hace años se dispone de una amplia oferta de estabilizadores de N en formulaciones con fertilizantes sólidos y fluidos.

Los ambientes de producción de cultivos extensivos de la Región Pampeana, debido al tipo de suelos y características climáticas, presentan características que los hace vulnerables a las pérdidas de N tanto por volatilización de amoníaco como por lixiviación de nitratos. Consiguientemente, potencialmente el uso de

estabilizadores de N tendría “nichos de mercado” significativos que deberán ser desarrollados en base a la evidencia científica local e internacional propendiendo a un uso adecuado de estas tecnologías.

La tendencia en innovación en relación a los estabilizadores de N se enmarca dentro del concepto de “apilar” diferentes tecnologías, combinando diferentes moléculas e ingredientes activos (IU+IN) para ser utilizadas en la fertilización de los cultivos, tanto a través de fertilizantes sólidos (e.g. urea) como fluidos (N anhidro, UAN, etc.). Asimismo, en los últimos años, distintas empresas a escala global también vienen evaluando la efectividad agronómica de la aplicación de fuentes de N combinadas con distintos estabilizadores de N y bioestimulantes. Este proceso de “innovaciones nutricionales apiladas” ha mostrado resultados muy promisorios, aportando al “cierre de brechas de rendimiento” en el cultivo de maíz y en otros cultivos extensivos, particularmente en contexto de alta variabilidad climática. En estas condiciones, los cultivos están sometidos tanto a pérdidas de N como así también a estreses abióticos (e.g. sequías, golpes de calor, anegamiento, salinidad, etc.) y los estabilizadores de N son parte de las soluciones que dispone el agricultor para optimizar la productividad de los cultivos minimizando el impacto ambiental de la fertilización.

Nutrición eficiente de pasturas para una producción ganadera sustentable

Ing. Agr. M.Sc. María Alejandra Marino

Unidad Integrada Balcarce
marino.mariaa@inta.gob.ar

Introducción

La ganadería aporta a la seguridad alimentaria, una nutrición equilibrada, la disminución de la pobreza y el crecimiento económico a nivel global. Sin embargo, como otras actividades humanas, tiene efectos adversos sobre el medio ambiente. La FAO señala que las emisiones asociadas con las cadenas ganaderas representan el 14,5% de todas las emisiones de origen humano y, entre las principales fuentes, se encuentran los gases producidos durante la digestión de los rumiantes y la descomposición del estiércol. Esto plantea profundos cuestionamientos. ¿Es posible desarrollar actividades ganaderas productivas, rentables y con bajo impacto ambiental?

A diferencia de otras regiones productoras del mundo, en la Cuenca del Río de la Plata, los sistemas ganaderos son mayoritariamente pastoriles y basan su alimentación en recursos forrajeros perennes (pasturas y pastizales) que ofrecen diversos servicios productivos y ecosistémicos. Sin embargo, muchos de sus beneficios no pueden ser aprovechados. En general, un manejo extensivo con desajustes en la utilización del pasto y recurrentes deficiencias nutricionales restringen su productividad y servicios ambientales.

La fertilización es una herramienta probada y útil para corregir deficiencias de nutrientes en cultivos y en recursos forrajeros, pero su uso en los establecimientos ganaderos locales es escaso. Por el contrario, en otras regiones ganaderas del mundo es una práctica habitualmente utilizada para la producción de forraje, aunque su uso excesivo o inadecuado ha ocasionado pérdidas (escorrentía, lixiviación, volatilización, etc.) y perjuicios al ambiente.

Actualmente, el desafío que enfrentan los sistemas agropecuarios es el diseño de estrategias productivas que conduzcan a lograr mayor productividad y rentabilidad de manera sustentable. Para ello es vital contar con herramientas que soporten la toma de decisiones

para ajustar la fertilización de pasturas y pastizales.

Se presentará información que contribuye en la planificación de estrategias de fertilización en sistemas ganaderos modernos de alta productividad y rentabilidad con bajo impacto socio-ambiental.

Importancia de las pasturas y pastizales rioplatenses

La expansión agrícola registrada en América del Sur ha desplazado la ganadería hacia áreas de menor aptitud productiva (Baeza y Paruelo, 2020). En la región pampeana y en Uruguay este proceso ocasionó un significativo deterioro de la calidad de los suelos (Sainz Rozas et al., 2018; Zalles et al 2021; Foucher et al 2023). Por el contrario, existen evidencias del impacto positivo de las rotaciones con cubiertas vegetales perennes, como son las pasturas y los pastizales naturales, sobre la salud del suelo (secuestro de carbono, incremento en la materia orgánica, mejora de la estructura, disminución de drenaje en profundidad, reducción de la escorrentía y erosión, etc.) (Studdert et al., 1997, Augarten et al., 2022; Chabbi et al 2023; Somoza y Vázquez, 2023). Asimismo, aportan servicios ecosistémicos (manejo y control de malezas, plagas y enfermedades, fijación de nitrógeno por las leguminosas forrajeras, biodiversidad, etc.), y beneficios socioeconómicos por brindar el forraje de calidad más barato para la alimentación de los rumiantes.

El clima templado húmedo de la región permite obtener alta producción de “pasto de calidad” durante buena parte del año. Sin limitantes hídricas ni nutricionales, en lotes de mejor aptitud productiva (suelos profundos, sin limitaciones por sales o sodio) pasturas bien manejadas pueden producir 12.000 a 15.000 kg MS/ha/año. Mayores producciones se logran cuando se incluyen especies como alfalfa. En ambientes menos productivos (como pueden ser

lotes bajos con agropiro) se podrían producir 9.000 a 12.000 kg MS/ha al año.

Limitantes a la producción en las pasturas y pastizales de la región

Actualmente, la ganadería extensiva se desarrolla en ambientes con características apropiadas para la realización de cultivos agrícolas (por ejemplo, pendientes pronunciadas, pH ácidos o alcalinos, drenaje deficiente, recurrentes déficits o excesos de agua, escaso desarrollo del perfil de suelo, etc.). Estos no son impedimentos para obtener alta productividad de pasto de calidad con especies forrajeras adaptadas a tales condiciones.

Sin embargo, en los establecimientos ganaderos locales, la producción de pasto lograda suele ser sustancialmente inferior a la esperada (entre 4000 y 8000 kg MS/ha/año para pasturas y aún menor en pastizales naturales). Entre los principales motivos se destacan desajustes en la utilización del pasto y en la nutrición mineral de las plantas.

Ajustar una adecuada cosecha del pasto es condición necesaria para mantener pasturas y pastizales productivos y persistentes. En pasturas bien manejadas se pueden obtener eficiencias de conversión de 10 a 15 kg de pasto/kg de carne, así como 1 kg de pasto/L de leche. En Argentina las eficiencias de conversión de pasto a producto animal son bajas a muy bajas, con valores de 25 a más de 40 kg MS/kg de carne (Recavarren, 2016). Aun en tambos, los animales en pastoreo rara vez consumen más del 65% del pasto producido (Lazzarini et al., 2019).

El otro aspecto que limita la producción de pasto es la nutrición mineral de las plantas. Es abundante la evidencia local e internacional que demuestra que en condiciones naturales (sin agregado de fertilizantes), el abastecimiento de algunos nutrientes generalmente es insuficiente para lograr los rendimientos que pueden alcanzar las forrajeras perennes.

¿Cómo afecta la nutrición mineral de las pasturas a los sistemas ganaderos?

Entre los nutrientes que con mayor frecuencia limitan el crecimiento de las pasturas y pastizales en la región pampeana se destacan el fósforo (P) y el nitrógeno (N).

La Figura 1 muestra la acumulación de forraje relativa (valor de cada tratamiento en relación con el máximo para cada sitio) para pasturas templadas en Francia (a) y para gramíneas

forrajeras perennes y anuales del sudeste bonaerense (b) según varía el grado de deficiencia de P y de N, medidos como índice de nutrición fosfatada (a) y nitrogenada (b).

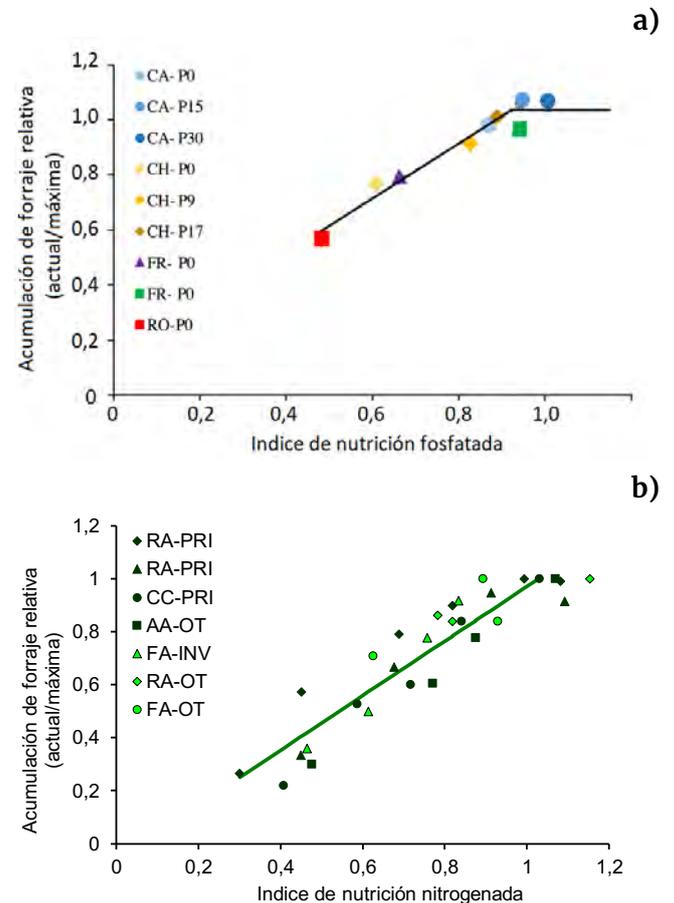


Figura 1: Relación entre la acumulación de forraje relativa (actual/máxima) y el Índice de nutrición fosfatada (a, adaptado de Jouany et al., 2021), o el Índice de nutrición nitrogenada (b, adaptado de Agnusdei et al., 2010). En (a) se recopilan experimentos realizados sobre pasturas perennes multiespecíficas en Canadá (CA), Francia (FR), Rumania (RU) y Suiza (CH). En (b) son experimentos realizados sobre raigrás anual en primavera (RA-PRI), raigrás anual en otoño (RA-OT), festuca en invierno (FA-INV), festuca en otoño (FA-OT), cebadilla criolla en primavera (CC-PRI) y agropiro en otoño (AA-OT) en el sudeste bonaerense.

Como muestra la Figura 1, la limitación nutricional se manifiesta independientemente del sitio y de la especie forrajera considerada. Cuanto más severa es la deficiencia, menor es el índice de nutrición y menor el rendimiento en relación con el máximo obtenido sin dicha limitación nutricional. En el otro extremo, cuando el índice de nutrición se aproxima al valor máximo 1, su abastecimiento es óptimo y permite alcanzar los máximos rendimientos. Un

relevamiento reciente realizado en pasturas de Uruguay, mostró que el 36% de las pasturas muestreadas presentaban niveles de deficiencia de P, mientras en el 51% se encontraron niveles de deficiencia de potasio (K). En el 66% de las pasturas base leguminosas y en el 97% de las pasturas base gramíneas se encontraron deficiencias de N (Cardozo et al., 2021).

El efecto de la disponibilidad de nutrientes también afecta el crecimiento radical. Esto ha sido ampliamente demostrado en especies forrajeras como alfalfa (Wang et al., 2023) o festuca (Martinefsky et al., 2010). La disminución en la biomasa radical provocada por deficiencias nutricionales es de gran importancia para los sistemas productivos, no sólo por el impacto en la captura de recursos (como agua y nutrientes), la producción y la persistencia de las pasturas. La fracción radical es la que mayoritariamente aporta al secuestro de carbono, por lo tanto, el valor de los recursos forrajeros perennes como sumideros de carbono también depende de la nutrición mineral (Chabbi et al., 2023).

Asimismo, la nutrición mineral afecta la resistencia a factores de estrés (como tolerancia al frío) y la persistencia de las plantas. Este aspecto puede explicar, al menos en parte, la corta persistencia productiva - 5, 6 años o menor - lograda en pasturas perennes de la región pampeana.

A pesar de que existe abundante evidencia, en los sistemas ganaderos extensivos locales, el agregado de nutrientes es poco habitual. Para sistemas con mayor nivel de intensificación como son los tambos, se ha determinado que sólo un 47% de los establecimientos fertilizan (Gastaldi et al., 2019).

Respuestas esperadas a la fertilización en pasturas

• Fertilización fosfatada

En gran parte de los ambientes ganaderos de la Región Pampeana, los suelos ofrecen baja disponibilidad de P edáfico para las plantas (Sainz Rozas, et al. 2019). Además, a diferencia de los lotes dedicados a cultivos agrícolas, no tienen fertilizaciones previas. Por esto, el agregado de fertilizante fosfatado suele incrementar la disponibilidad de P en el suelo, la concentración en las plantas y, consecuentemente, la producción de forraje. Cabe aclarar que, para evitar ineficiencias y perjuicios económicos y

ambientales, es muy importante ajustar la dosis adecuada.

En la región pampeana diversos autores demostraron el efecto negativo de la deficiencia de P en la producción forrajera de pasturas de alfalfa (Fontanetto et al., 2010; Pautasso y Barbagelata, 2018; Marino y Echeverría, 2018). En estos recursos de alto rendimiento, el nivel de P crítico (nivel de P no limitante para alcanzar rendimientos cercanos a los valores máximos) se aproxima a 18 ppm P Bray (Figura 2) (Marino y Echeverría, 2018; Pautasso y Barbagelata, 2018). Esto indica que una disponibilidad de P inferior a 18 ppm P Bray sería insuficiente para abastecer el crecimiento de pasturas de alfalfa con producciones esperadas de aproximadamente 15 t MS/ha/año.

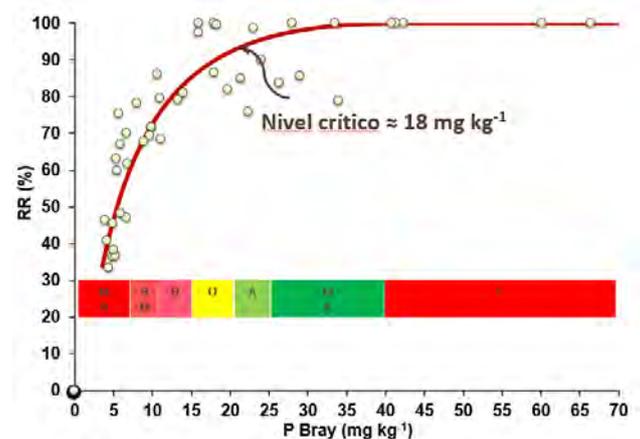


Figura 2: Rendimiento relativo (RR) de alfalfa en función del fósforo Bray en el suelo (P-Bray). Se indica el nivel crítico y las categorías de deficiencia de P: MB: muy bajo, BM: bajo menos, B: bajo, O: óptimo, A: alto, MA: muy alto, E: excesivo (Marino y Echeverría, 2018).

Por su parte, para pasturas de base gramíneas de la región pampeana disponibilidades de P en el suelo < 10 ppm P Bray, se registraron disminuciones significativas en la producción de forraje con relación a los tratamientos con P agregado (Borrajo et al., 2022; Fernández et al., 2020).

Cabe destacar que, por su escasa movilidad en el suelo, el efecto de la aplicación de P manifiesta un efecto residual durante varias campañas posteriores a la fertilización. Así, en suelos con bajo P Bray respuestas a la fertilización fosfatada de 100 a 200 kg MS/kg P aplicado han sido mencionadas en trabajos locales. Esto implica que si se cosecha convenientemente el forraje producido se podría lograr una producción de 7 a

13 kg carne/kg P aplicado o 100 a 200 L leche/kg P aplicado.

- **Fertilización nitrogenada**

El N es el nutriente que generalmente más limita el crecimiento vegetal. Como se mencionó, las leguminosas podrían autoabastecerse de este nutriente a través de la FBN. En cambio, para gramíneas forrajeras el abastecimiento de N edáfico es fundamental, ya que no tienen la capacidad de realizar la FBN. Es esperable que suelos con mayor contenido de materia orgánica puedan ofrecer por mineralización mayor cantidad de N disponible para las plantas (NO_3^-). Pero en regiones templadas como la pampeana, las pasturas sin limitaciones hídricas o de otros nutrientes pueden crecer buena parte del año, y capturan NO_3^- que se encuentra disuelto en la solución del suelo. Esto ocasiona que, en suelos con pasturas templadas perennes establecidas, los niveles de NO_3^- permanezcan en valores bajos y de manera casi constante a lo largo del año. Adicionalmente, la mineralización de N comienza a disminuir cuando bajan las temperaturas en otoño y alcanza valores mínimos durante la época fría (invierno).

Por lo anterior, la respuesta al agregado de N en pasturas base gramíneas depende de las condiciones ambientales que controlan el crecimiento de las plantas y también del suministro de N. En la Figura 3 se presenta una recopilación de datos obtenidos en ensayos de fertilización nitrogenada realizados en zonas de clima templado-húmedo (en Argentina y en Australia). Como se esperaba, las mayores respuestas al N aplicado se obtienen con los rebrotes que presentan mayores tasas de crecimiento en primavera, en los cuales las aplicaciones de N se efectuaron a la salida del invierno. Esto se relaciona con plantas que tienen capacidad de crecimiento, demandan N y se encuentran con mínima disponibilidad del nutriente en el suelo. Por otra parte, las respuestas suelen ser de menor magnitud para fertilizaciones en otoño, con menores tasas de crecimiento por la baja temperatura. De todos modos, cualquier factor que favorezca o limite el crecimiento vegetal o la disponibilidad de N afecta la respuesta obtenida.

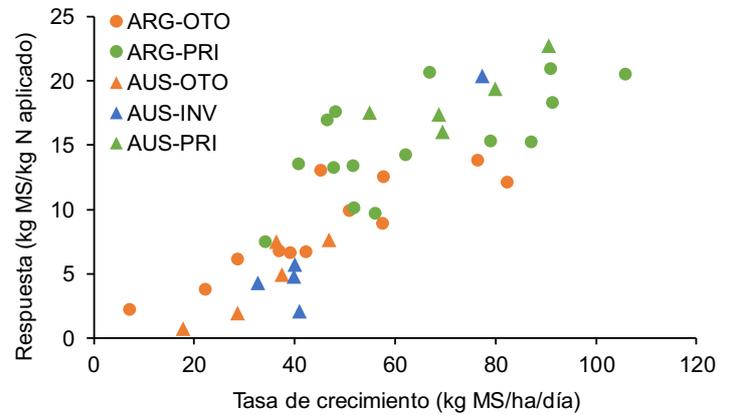


Figura 3. Tasas de crecimiento para otoño, invierno, primavera y respuestas al N aplicado en pasturas de gramíneas templadas. Datos recopilados del sudeste bonaerense, Argentina (ARG-OTO y ARG-PRI) y de Australia (AUS-OTO, AUS-INV y AUS-PRI, Christie et al., 2018).

- **Interacción entre nutrientes**

Con frecuencia en pasturas templadas se observa que la deficiencia de un nutriente restringe la respuesta al agregado de otro nutriente. A modo de ejemplo, en la Figura 4 se muestra para el rebrote primaveral de una pastura de festuca, que la respuesta al N aplicado sin deficiencia de P (con aplicación de P, CP) duplicó aquella obtenida para el tratamiento al que no se le aplicó P (SP). En este caso, para dosis de 50 kg N/ha (aproximadamente 110 kg urea/ha) la respuesta sería de 17 kg MS/kg N aplicado sin agregado de P (SP) y de 33 kg MS/kg N aplicado con agregado de P (CP).

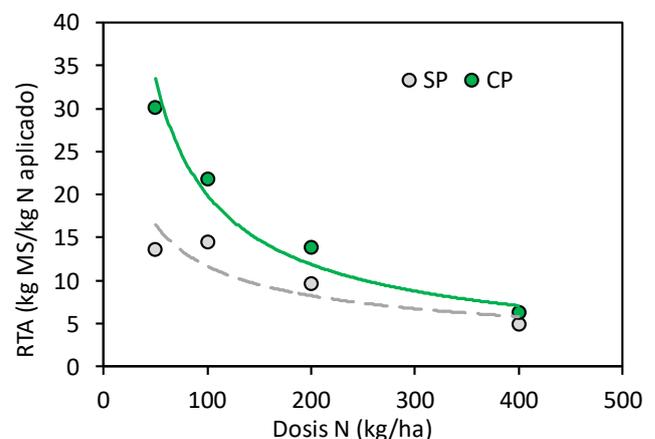


Figura 4: Respuesta al N aplicado (RTA, kg MS/kg N aplicado) a fin de invierno en el crecimiento primaveral de una pastura de festuca en el sudeste bonaerense, sin (SP) y con (CP) agregado de P.

Planificar una fertilización eficiente en sistemas ganaderos sustentables

La aplicación de fertilizantes es una práctica recomendada para cubrir las necesidades nutricionales de las plantas, pero sin un adecuado diagnóstico puede provocar perjuicios económicos y ambientales. Para aumentar la eficiencia de su uso y minimizar los potenciales efectos negativos, es necesario elaborar un plan de fertilización que se ajuste a la necesidad de cada empresa.

- **Producción de forraje esperada**

La cantidad de nutrientes requeridos por una pastura está determinada por la tasa de crecimiento y la acumulación de forraje, es decir a medida que las condiciones edáficas (propiedades físicas y químicas del suelo) y climáticas (temperatura, humedad, fotoperíodo) son más favorables la demanda de nutrientes aumenta. Por el contrario, en presencia de limitaciones al crecimiento de las plantas la demanda de nutrientes es menor. En la Figura 5, puede observarse la acumulación de N y de P para un período de crecimiento primaveral en una pastura de festuca.

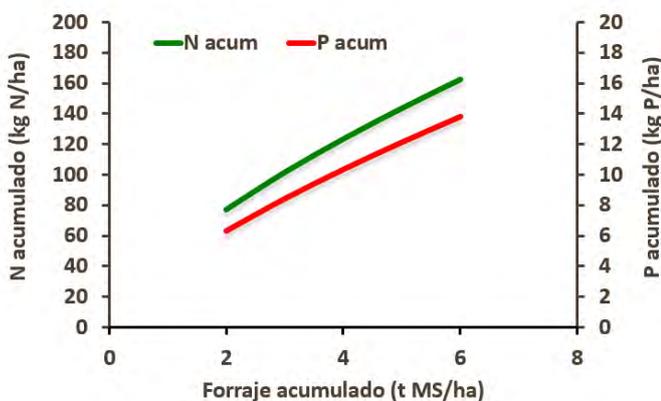


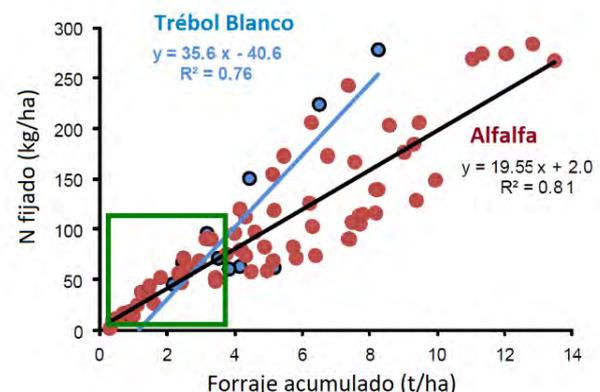
Figura 5: Acumulación de N y de P en planta de festuca en función del forraje acumulado durante un rebrote primaveral (Marino et al., 2003).

- **Caracterización de la oferta de nutrientes y fijación biológica de N (FBN)**

Para establecer la necesidad de fertilización es fundamental conocer la oferta de nutrientes del suelo donde crecen las plantas. Esta varía ampliamente en el espacio y en el tiempo (según las características y el manejo del suelo, la historia productiva y de fertilizaciones, las condiciones climáticas, etc.), por lo que resulta indispensable contar con información de análisis de suelo y/o de planta que permitan llevar a cabo un diagnóstico nutricional.

Además, las leguminosas forrajeras que integran pasturas y pastizales, pueden aprovechar el N atmosférico que es fijado biológicamente por bacterias en los nódulos radicales (FBN). Ese N fijado no sólo abastece a la leguminosa, sino que una parte puede ser transferido a las plantas vecinas no fijadoras. Es de destacar que deficiencias de P (u otros nutrientes) limitan la FBN. La cantidad de N fijado por las leguminosas depende de la especie considerada y de su crecimiento (Figura 6). Sin deficiencias hídricas ni nutricionales, valores de N fijado de 100 (tréboles) a más de 300 (alfalfa) kg N/ha son esperables para estas leguminosas templadas (Unkovich, 2012). Pero, a excepción de alfalfa, la participación de leguminosas en las pasturas consociadas y en los pastizales naturales de sistemas ganaderos locales en general es baja, y representan 20 % o menos de la biomasa aérea de las mezclas. Por lo tanto, los valores de FBN que se podrían esperar serían 100 a 150 kg N/ha/año (Figura 6).

Figura 6: Relación entre la acumulación de forraje y la cantidad de nitrógeno fijado en pasturas de trébol blanco y de alfalfa. El recuadro verde indica los valores



más frecuentes (Adaptado de Unkovich, 2012).

- **Tipo de utilización (pastoreo o corte)**

En los sistemas pastoriles extensivos de la región los animales consumen una parte del forraje disponible (en sistemas extensivos locales de 30 a 50%), y retienen un pequeño porcentaje de los nutrientes que contienen las plantas (5 a 25% en animales de carne y leche, respectivamente). La mayor parte de los nutrientes consumidos por el ganado vuelve al sistema en forma de heces y orina, aunque en las condiciones locales de producción, la mayor parte se acumulan en torno a montes y aguadas (sitios de descanso) (Diaz Zorita y Barraco, 2002). Aumentar la distribución de bebederos en los lotes en pastoreo permitiría mejorar la distribución y el aprovechamiento de los nutrientes aportados a través de las deyecciones.

La utilización del forraje para confección de reservas (corte y recolección), práctica comúnmente utilizada en establecimientos con mayor intensificación como los tambos, genera una mayor remoción (70 a 80%) de la biomasa aérea de las plantas sin retorno de nutrientes, con una mayor exportación de los mismos comparado con la que provocan los animales en pastoreo. Esto debe ser tenido en cuenta al momento de planificar las estrategias de fertilización (frecuencia y dosis).

Un ejemplo del beneficio económico de la fertilización

En pasturas pastoreadas buena parte del éxito de una fertilización depende de la eficiencia de

cosecha del pasto producido. En muchas ocasiones “ineficiencias en la cosecha del pasto” impiden cuantificar el beneficio de la práctica (Grasa et al., 2022). A modo de ejemplo, en la Figura 7 se puede observar el beneficio adicional del agregado de N a fin de invierno (en forma de urea) en una pastura de festuca, utilizada para la producción de carne (a) o de leche (b). La respuesta a la fertilización (kg MS adicionales/kg N aplicado) se transforma en carne o en leche, a partir de una eficiencia de conversión (kg carne/kg MS o L de leche/kg MS). Entonces, si se valoriza el costo del kg de N y se estima el ingreso posible de obtener con ese fertilizante convertido en carne o en leche, se obtiene un beneficio adicional por cada unidad de fertilizante aplicado. Para los cálculos se considera una respuesta a la fertilización nitrogenada de 20 kg MS adicionales/kg N aplicado. Además, se comparan dos eficiencias de conversión de pasto a carne, baja (25 kg MS/kg carne) y alta (15 kg MS/kg carne), así como dos eficiencias de conversión pasto a leche, baja (2 kg MS/L de leche) y alta (1 kg MS/L de leche).

Como se puede observar, en todos los años un escaso control de la cosecha de pasto (25 kg MS/kg carne o 2 kg MS/l leche) redujo sensiblemente el beneficio adicional de producir más pasto a partir de la fertilización nitrogenada (Figura 7 a y b). Aun así, para el período considerado un manejo con baja eficiencia de cosecha de pasto provocó un beneficio adicional promedio de 0,14 U\$S/kg N aplicado en producción de carne, y de 2 U\$S/kg N aplicado en producción de leche.

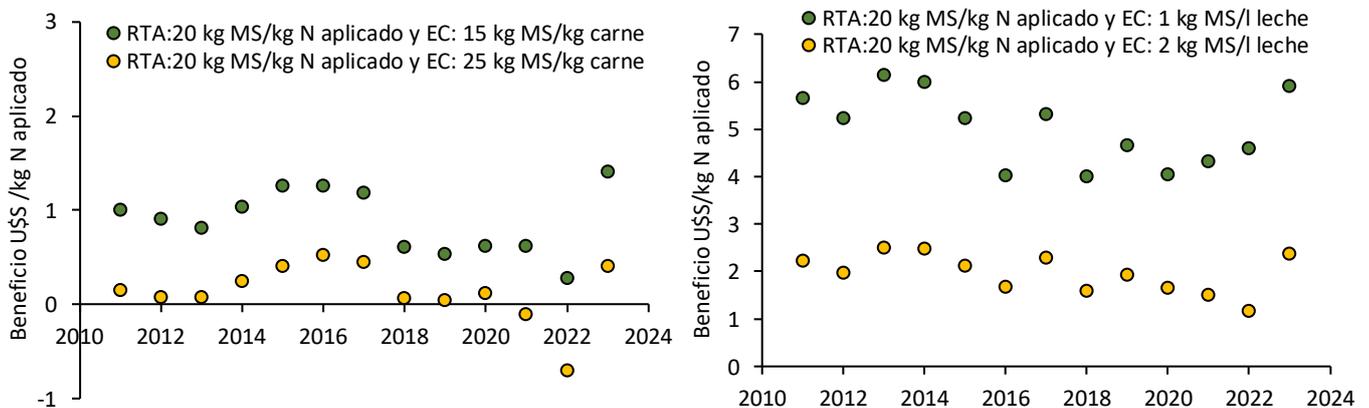


Figura 7: Beneficio adicional (U\$S, ingreso por carne (a) o leche (b) por kg N aplicado – costo del N) durante el período 2011 a 2023, según la eficiencia de conversión de pasto en carne (15 y 25 kg MS/kg carne, respectivamente) o de pasto a leche (1 y 2 kg MS/L leche, respectivamente).

En cambio, un adecuado aprovechamiento del pasto producido (15 kg MS/kg carne o 1 kg MS/L leche) permitió aprovechar los beneficios de la fertilización nitrogenada, con un beneficio adicional promedio de 0,89 U\$S/kg N aplicado y 5 U\$S/kg N aplicado en producción de carne y en producción de leche, respectivamente.

Este tipo de análisis no se efectúa en los sistemas ganaderos locales. La falta de medición de la disponibilidad de pasto y la ineficiencia de su cosecha hace que habitualmente se subestimen los beneficios de la fertilización. Como muestra la Figura 7, a pesar de que los cambios interanuales provocan una marcada inestabilidad en las relaciones de precio insumo/producto, el beneficio adicional obtenido de la práctica se mantiene.

Fertilización de pasturas con bajo impacto ambiental

La necesidad de desarrollar sistemas ganaderos sustentables ha impulsado numerosas investigaciones para evaluar el impacto ambiental de la aplicación de fertilizantes en pasturas. En el país (De Prado et al., 2000; Barbieri et al., 2006) y principalmente en otras regiones ganaderas del mundo (Vogeler y Cichota, 2015; Fornara et al., 2020) se han cuantificado las pérdidas hacia el ambiente relacionadas con la aplicación de fertilizantes en pasturas. Existe acuerdo en que, estrategias de fertilización diseñadas para cada sistema productivo (objetivo empresarial, presupuestación forrajera, capacidad operativa, etc.), en base a información sitio-específica (recursos forrajeros, diagnósticos nutricionales, pronósticos climáticos, etc.) con la aplicación del conocimiento disponible (procesos bioquímicos y ecofisiológicos), permitirán sostener sistemas ganaderos de alta producción y bajo impacto socio-ambiental.

Consideraciones finales

El estado actual del conocimiento sobre fertilización de pasturas aporta evidencias para sostener la factibilidad de lograr sistemas ganaderos productivos y sustentables. El logro de este objetivo no será tarea sencilla para la ganadería local, ya que implica mayor grado de control sobre variables que todavía no son convenientemente manejadas. Sin embargo, la

región presenta condiciones únicas para aportar a un mercado local y global que pronto exigirá procesos productivos acordes con los objetivos de desarrollo sostenible (seguridad alimentaria, secuestro de carbono, huella de carbono, bajo impacto socio-ambiental, etc.). Esto representa un desafío y una gran oportunidad para la ganadería regional.

Bibliografía

- Augarten, A. J., Malone, L. C., Richardson, G. S., Jackson, R. D., Wattiaux, M. A., Conley, S. P., Radatz, A. M., Cooley, E. T., & Ruark, M. D. 2023. Cropping systems with perennial vegetation and livestock integration promote soil health. *Agricultural & Environmental Letters*, 8, e20100. <https://doi.org/10.1002/ael2.20100>
- Baeza, S. Paruelo, J.M. 2020. Land Use/Land Cover Change (2000–2014) in the Rio de la Plata Grasslands: An Analysis Based on MODIS NDVI Time Series. *Remote Sens.* 2020, 12, 381; doi:10.3390/rs12030381
- Barbieri P. A., Echeverría H. E., Rozas H. R. Sainz, Picone L. I. (2006) Nitrogen use efficiency from urea applied to a tall wheatgrass (*Elytrigia elongata*) prairie in a sodic soil. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 46, 535–543. <https://doi.org/10.1071/EA04180>
- Borrajó C.I., López Valiente S., Marino M.A., Cicore P.L., Errecart P.M. y Berone G.D. 2022. Producción de forraje y eficiencia de uso de P y N en festuca fertilizadas con dosis combinadas de P y N. *Revista Argentina de Producción Animal Vol 42 SUPL. 1:154.*
- Cardozo, G.A., Lattanzi, F.A., Lussich, F. 2021. Relevamiento del estado nutricional de pasturas sembradas y mejoramientos de campo natural con leguminosas forrajeras en Uruguay Niveles de nitrógeno, fósforo y potasio. Marzo 2021, *Revista INIA* 35–39.
- Chabbi, A. Rumpel, C., Klumpp, K. Franzluebbers, A.J. 2023. Managing grasslands to optimize soil carbon sequestration. Chapter taken from: Rumpel, C. (ed.), *Understanding and fostering soil carbon sequestration*, pp.523–554, Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, UK, 2023, (ISBN: 978 1 78676 969 5; www.bdsublishing.com). <http://dx.doi.org/10.19103/AS.2022.0106.17>
- Christie, K.M., Smith, A.P., Rawnsley, R.P., Harrison, M.T., Eckard, R.J. 2018. Simulated seasonal responses of grazed dairy pastures to nitrogen fertilizer in SE Australia: Pasture production. *Agricultural Systems* 166 (2018) 36–47.
- De Prado, M.R., Echeverría, H.E., Lattanzi, F.A., San Martín, N.F. 2000. Evolución otoño invernal del nitrógeno mineral en un Natracuol Típico bajo festucas con diferente hábito de crecimiento. *Revista de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo* 19: 39–46.

- Diaz Zorita, M. y Barraco, M. 2002. ¿Cómo es el balance de P en los sistemas pastoriles de producción de carne en la región pampeana? *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, N° 13, Marzo 2002.
- Dubeux, J.C.B. Sollenberger, L.E. 2020. Chapter 4: Nutrient cycling in grazed pastures. *Management Strategies for Sustainable Cattle Production in Southern Pastures* 59 – 75. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814474-9.00004-9>.
- Fernández, F.E., Marino, M.A., Lardoueyt, J.E., Fuente, J., Rodríguez, G.A., Heguy, B. 2020. Efecto del agregado de fósforo y nitrógeno en la producción forrajera de una pastura de festuca. 43° Congreso Argentino de Producción Animal. *Revista Argentina de Producción Animal* Vol. 40 Supl. 1: 53.
- Fornara, D. A., Flynn, D., Caruso, T. 2020. Improving phosphorus sustainability in intensively managed grasslands: The potential role of arbuscular mycorrhizal fungi. *Science of The Total Environment*, 706, 135744.
- Foucher, A., Tassano, M., Chaboche, PA. et al. Inexorable land degradation due to agriculture expansion in South American Pampa. *Nat Sustain* (2023). <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01074-z>
- Grasa, O.; Marino, M.A.; Urcola, H.; Berone, G.D. 2022. Beneficio económico del buen manejo de pasturas. *Visión Rural Año XXIX N° 142*: 28-33.
- Jouany, C., Morel, C., Ziadi, N., Belanger, G., Sinaj, S., Stroia, C., ... & Duru, M. (2021). Plant and soil tests to optimize phosphorus fertilization management of grasslands. *European Journal of Agronomy*, 125, 126249.
- Marino, M.A., Echeverría, H.E. y Agnusdei, M.G. 2003. Acumulación otoñal de forraje y captura de nitrógeno de festuca alta según el contenido de fósforo de la pastura. "26° Congreso Argentino de Producción Animal". Mendoza. *Rev. Arg. Prod. Anim.* Vol. 23 Supl.: 227-228. ISBN-ISSN 0326-0550
- Marino, M.A. y Echeverría, H.E. 2018. Umbral de requerimiento de fósforo en suelos Argiudoles y guía para la fertilización de alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*. 31: 7 – 18.
- Marino, M.A., Errecart, P.M., Cicore, P.L., Borrajo, C.I., Wyngaard, N., Laplacette, C., Insua, J. 1, Berone, G.D. 2022. Producción de forraje y eficiencia de uso de nitrógeno en pasturas de festuca según el suministro de fósforo. *Revista Argentina de Producción Animal* Vol 42 SUPL. 1:146.
- Martinefsky, M.J., Assuero, S.G., Mollier, A., Pellerin, S. 2010. Analysis of the response of two tall fescue cultivars of different origin to P deficiency. *Environmental and Experimental Botany* 69 (2010) 250–258.
- Pautasso, J.M. y Barbagelata, P.A. 2018. Actualización del umbral de fósforo Bray para el cultivo de alfalfa en Entre Ríos (Argentina). *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*. 26: 13 – 16.
- Recavarren, P. 2016. La producción agropecuaria en Olavarría, Benito Juárez, Laprida y Gral. La Madrid: evolución y desafíos a future. Ediciones INTA, 2016. Libro digital, PDF. Archivo Digital: descarga y online ISBN 978-987-521-767-6
- Somoza, A. y Vázquez, P. 2022. Variación espacio temporal del stock de carbono orgánico y su relación con los cambios en el uso del suelo. Partido de Tandil, Región Pampeana Austral, Argentina. *Revista geográfica de America Central* 70(1) · Enero-junio 2023 Doi: <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.70-1.18>. 477-514. ISSN 1011-484X · e-ISSN 2215-2563
- Studdert, G. A., Echeverría, H. E., & Casanovas, E. M. (1997). Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a typic Argiudoll. *Soil Science Society of America Journal*, 61(5), 1466-1472.
- Vogeler, I., Cichota, R. 2016. Deriving seasonally optimal nitrogen fertilization rates for a ryegrass pasture based on agricultural production systems simulator modelling with a refined AgPasture model. *Grass and Forage Science*, 71(3), 353-365.
- Unkovich, M. 2012. Nitrogen fixation by legumes in Australian dairy pasture systems: review and prospect. Report for Dairy Australia Project C100000293 N transformations and loss pathways Sub-project 2E: N2 fixation. Dairy Australia.
- Zalles, V. et al. Rapid expansion of human impact on natural land in South America since 1985. *Sci. Adv.* 7, eabg1620 (2021). DOI:10.1126/sciadv.abg1620

El Sistema Pastoril

Elena Patron

J. Rodó, Uruguay
elenpatron@gmail.com

La pastura tiene dos funciones: 1) ser el alimento NATURAL (y más barato) para alimentar a los vacunos, y 2) ser un factor fundamental en la construcción y recuperación de la Fertilidad de los Suelos, por incrementos en los contenidos de la Materia Orgánica del Sistema (MO, indicador más importante de la Calidad del Suelo) a través de la fijación del C atmosférico en compuestos orgánicos (biomasa aérea y raíces) y la fijación biológica del Nitrógeno atmosférico.

Los fundamentos del Sistema de 1000 Kg de Carne/ha o 12000 Litros de Leche/ha a PASTO se basan principalmente en que el forraje producido sea pastoreado directamente por los animales (que devuelven aproximadamente el 90% de lo consumido al lugar donde pastorean), y que estas pasturas sean una mezcla de gramíneas y leguminosas, fertilizadas con los nutrientes necesarios para lograr 15 ton de M.S/ha (Figura 1)

Producción a PASTO



Figura 1. El sistema de producción a pasto de 1000 kg de carne por ha.

Se debería alcanzar un status de nutrientes equivalente al que se maneja como ÓPTIMO en

Nueva Zelanda para obtener Pasturas Productivas y Sistemas Rentables:

PH	5,8 - 6,3
M. Orgánica	7 - 17 %
P	20 - 30 Olsen
K	0,8 - 1,2
Ca	6 - 12
Mg	1 - 3
Na	0,20 - 0,50
CIC	12 - 25

Cuadro Nº 1: Status de Nutrientes para Pasturas en N.Z.
(Hill Laboratories, Hamilton, NZ.)

El establecimiento de pasturas perennes con gramíneas, durante al menos 5 años, permite la recuperación física de los estratos superiores de suelos degradados de manera contundente (aumento de la MO), y la obtención de 1000 Kg de Carne/ha siempre y cuando:

1. La producción de Pasturas sea al menos de 15.000 Kg de MS/ha
2. La Utilización de la Pastura producida sea al menos del 80% con Agua en la Parcela
3. La conversión de la Pastura en Carne (debe ser al menos de 12-14:1)

El cuidado que hagamos de todos sus componentes, para que puedan trabajar en forma coordinada determinará el éxito en los objetivos trazados y nos permitirá lograr 1000 Kg de carne/ha.

Esta propuesta se basa en maximizar todos los componentes que afectan al Sistema Pastoril. El proyecto apunta a la implementación de un paquete conocido, pero pocas veces aplicado en forma integral, que aumente la Producción de Forraje, su Consumo y la Conversión en Carne.

Levantando las restricciones de déficit de nutrientes se puede llegar, aún en suelos pobres, a producir 4 o 5 veces más por unidad

de superficie. Tanto en la producción de Materia Seca como en la productividad animal, permitirá multiplicar varias veces los actuales números, dado que la Materia Seca que se produce es de mayor calidad. Y aunque pueda parecer muy costoso por el Uso de fertilizantes, la realidad nos indica lo contrario: al aumentar la Producción, baja el Costo de la Materia Seca producida, que es de Mayor CALIDAD.

Para ello es preciso tener un Sistema definido y bien diseñado que permita una ALTA Utilización del Pasto producido. *Atender todos los factores que influyen y afectan a los tres componentes en forma simultánea son la condición "sine qua non" para lograr los resultados propuestos:*

- **Aumento sostenido de la Materia Orgánica del Suelo (Fertilidad del Suelo)**
- **Producciones de Carne de 1.000 Kg /ha,**
- **Buen Ingreso Neto/ha en forma sostenible**

Las claves del sistema la aportan:

1. **El incremento en la fertilidad del suelo**
2. **La mayor Producción y Utilización de Pasturas**
3. **El aumento de la Carga**
4. **Seguimiento técnico**
5. **Calidad de los Procesos de Producción (Aplicación en tiempo y forma)**
6. **Conformación de un Equipo humano comprometido con el Sistema**

Se trata de una tecnología de procesos, donde es fundamental la claridad de objetivos, los conocimientos, habilidades y desarrollo de destrezas, para de esta manera obtener muy buenos resultados en el predio, los 6 puntos, todos ellos fundamentales para alcanzar lo propuesto a través del sistema pastoril, trabajan juntos y en forma coordinada.

La filosofía de la propuesta se basa en el logro de los siguientes procesos específicos:

1. **Siembra de especies y cultivares forrajeros** que aseguren la máxima calidad y cantidad en la oferta forrajera (al menos 15 ton de MS/ha).

2. **Uso adecuado de fertilizantes** en tipo y cantidad, según requerimientos de nutrientes de cada una de las especies y análisis de suelo, para maximizar la producción de forraje (al menos 15000 kg MS), con Balance de Nutrientes positivo, y **con Agua en la Parcela**, para que las deyecciones (90% del forraje consumido) caigan en cada parcela pastoreada, y se incorporen al suelo, proceso fundamental en la recuperación de las propiedades físicas y químicas del suelo (y aumente la fertilidad del suelo). Pero se debe tener en cuenta que dotación vamos a mantener en esas Pasturas y en función de ello, fertilizar, según los siguientes cuadros (*Fertilizer Use on NZ Beef and Dairy Farms 2018*):

Kg de Nutrientes/ha según la carga animal en ganadería de Carne (dotación/ha), para mantener el Status óptimo de suelos

Eq. Vacuno (300 Kg) Cab/Há	Stock Unit/Há S.U. = 1 Oveja	P	K	S
1,4	7	6 - 18	0 - 21	6 - 19
2,0	10	10 - 22	0 - 28	8 - 25
2,6	13	15 - 28	0 - 35	10 - 29
3,2	16	21 - 34	0 - 41	13 - 33
3,8	19	28 - 41	0 - 41	15 - 37
4,4	22	34 - 44	0 - 54	17 - 41

Kg de Nutrientes/ha según la carga animal en Lechería (dotación/ha), para mantener el Status óptimo de suelos

Vacas/Há De 460 Kg PV, 330 Kg sólidos	P	K	S
2	20-28	20-50	10-23
2,5	27-36	25-58	13-30
3	34-45	40-70	16-35
3,5	43-55	50-82	19-40
4	54-65	60-95	22-45

N.Z. Fertiliser Manufacturer's Research Association, 2018

Extracción de Nutrientes INPOFOS (2003) expresados en Kg/Ton. M.S.

	N	P	K	S	Ca
T.Blanco <i>T.repens</i>	25-35	3,6	20	3	
T.Rojo <i>T.pratense</i>	22	3,4	24	4,5	
Alfalfa <i>Medicago sativa</i>	25-30	2,2-3,3	18-25	2,5-5	11-12,5
Raigras: <i>Lolium sp.</i>	28-35	2,4-3,5	18-25	2-3	5-8
Festuca <i>Festuca arundinacea</i>	19	3,0-4	24-28	2-3	4,6
Sorgo Forrajero <i>Sorghum bicolor</i>	11	2,8	12,7	2,6	
Sorgo Granifero: A y E	30 20	4 4	21 4	4 2	0,9
Avena: A y E	34 20	5 3	20 3	6 1,8	-

3. Diseño apropiado del Sistema de Pastoreo que permita utilizar la mayor parte del forraje producido (al menos el 80%), bajo formato Pastoreo Directo, Con ALTAS CARGAS instantáneas, que la ocupación no sea mayor a las 24 horas con una UTILIZACION del 80%, y que las deyecciones queden bien distribuidas en las parcelas pastoreadas. Los excedentes de forraje de la primavera que no se logren pastorear en tiempo y forma, serán cortados y enfardados, para ser suministrados a los animales en épocas de menor crecimiento de la pastura, y (en lo posible) en las mismas parcelas donde pastorean los distintos grupos de animales, y si esto no fuera posible, se deberán reponer los nutrientes extraídos según la Tabla de EXTRACCION DE NUTRIENTES (INPOFOS, 2003).

4. Incorporación del concepto BIENESTAR ANIMAL en su más amplia acepción: sanidad, confort térmico, agua de calidad disponible en los lugares de pastoreo, etc.; que permita la conversión del Pasto en Carne en una relación de al menos 12 -14 :1. Esto incluye el Agua en la Parcela, la Sanidad, reducir el stress térmico a través de la forestación, etc.

5. MANEJO RACIONAL del Rodeo Vacuno maximizando la producción individual a través de Prácticas de Manejo racionales (tamaños de grupo lo más chico posibles), suplementación con fardos cuando la FDN del forraje sea inferior al 28% (otoño) o cuando la Tasa de Crecimiento sea menor a la demanda, y/o con suplementación energética en Otoño, si se quisiera maximizar la ganancia individual y las relaciones de precios Carne/Grano fueran convenientes. Y **MANEJO RACIONAL DE LAS PASTURAS** pastoreando según la Tasa de Crecimiento (Manejo IDEAL), y cuando la Tasa de Crecimiento exceda el Consumo Animal, se ENFARDARÁ TODO el forraje sobrante de la primavera, para transferirlo a otros momentos del año en que la Tasa de Crecimiento es menor al Consumo.

6. Aplicar técnicas de Gestión para mejorar la aplicación del sistema (con Presupuesto Forrajero, Registros y Análisis), conformando un sólido **Equipo de gente**, donde cada uno tenga claro el funcionamiento del Sistema, el rol a desempeñar y esté comprometido con el mismo.

Las limitantes del Sistema están relacionadas con el manejo del ganado cuando las condiciones climáticas sean:

- De excesos hídricos por largos períodos de tiempo, en tanto la rotación se estabiliza con las pasturas perennes de más de 2 años (en base a Festucas).
- De sequías prolongadas, por lo que la confección de reservas en la época de excesos (primavera) deberá ejecutarse anualmente.

Se considera que la unidad de producción sobre la que debemos trabajar y calcular la Producción, es la ha, por lo que toda la superficie, que sea pasible de ser mejorada, debería mejorarse con estos criterios. El cuidado que hagamos de todos sus

componentes, para que puedan trabajar en forma coordinada, determinará el éxito en los objetivos trazados.

Alta producción a bajo costo viabiliza que la familia rural en pequeños predios se quede en el campo

Tanto Uruguay como toda la zona llamada Pastizales del Cono Sur tienen ventajas comparativas para el sistema pastoril, sistema muy estable en sus resultados, incluso en invierno, ya que es la segunda mejor estación del año (luego de la primavera) para producir pasto de calidad, por lo que poner en marcha este sistema en la enorme superficie que hoy apenas produce una fracción de su potencial de leche y/o carne/ha, transformaría radicalmente la situación económica de nuestros países y su gente.

En predios de 50 hectáreas o menores, este sistema por su elevada productividad (500.000

litros de leche o 50.000 kilos de carne) y bajos costos (60%), permiten al productor obtener un margen por ha muy interesante, viabilizando su permanencia en el sector productivo, incluso cuando el precio de los productos disminuye o el de los insumos sube.

Este Sistema, además de generar muy buenos márgenes/ha, es un excelente regenerador del ciclo agrícola, ya que además de que el vacuno se transforma en un genuino reconstructor de la materia orgánica (si tiene Agua en la Parcela y Pasturas de Alta digestibilidad) porque devuelve con las deyecciones aproximadamente del 90% de lo que ingiere, y como la cuenta de la carne da, se fertiliza con todo lo que precisan las 15 ton de MS, y además puede reponer todos los nutrientes que se llevaron los cultivos y reconstruir la MO del suelo perdida en la fase agrícola, porque a ella la cuenta no le da...

Avances en fertilización nitrogenada en maíz en el NEA

Nicolás I. Stahringer¹, Javier A. Fernández², Suyai Almirón³ y Andrés Madias³

¹ Facultad de Ciencias Agrarias – Univ. Nacional del Nordeste

² University of Queensland, Australia

³ Aapresid – Sistema Chacras

Nota: Trabajo actualizado del original presentado en la Revista de la Red de Nutrición de Cultivos del Norte Argentino – Resultados Campañas 2020/21 y 2021/22.

Introducción

El nitrógeno (N) es el pilar de la nutrición del maíz, siendo el nutriente que más frecuentemente limita la producción de este cultivo (Correndo y García, 2014). La fertilización nitrogenada en maíz es una práctica habitual debido a la relación positiva costo/beneficio por la elevada frecuencia con la que se obtiene respuesta positiva a la aplicación de N (Salvagiotti et al., 2002). Por este motivo, se considera que el N es la “bala de plata” de la fertilización de maíz (Reussi Calvo et al., 2020).

El incremento de productividad como respuesta al aumento del N disponible se ajusta a lo que se conoce como respuesta de rendimientos decrecientes (Maddoni et al., 2003).

Una forma simplificada de interpretarlo es utilizando un modelo conocido como lineal-plateau. Básicamente, la interpretación de dicho modelo consiste en que se observa un aumento del rendimiento en forma lineal mientras este nutriente limita la producción. Luego, llegado un punto, la respuesta deja de ser lineal al aumento de la dosis de N porque este nutriente deja de limitar la producción que puede llegar a estar limitada por otros recursos (agua, otros nutrientes, etc.). A partir de dicho punto, por más que se continúe incrementando la dosis de N no habrá incremento de productividad y se habrá alcanzado un “techo” que se conoce como “plateau”.

La principal herramienta utilizada en Argentina para el diagnóstico y la posterior recomendación de N en maíz se basa en la disponibilidad de N (Nd). El Nd se obtiene de sumar el N del suelo (Ns), obtenido mediante la determinación del N de nitratos en el suelo en la

profundidad de 0-60 cm previo a la siembra, más el N aportado por el fertilizante (Nf). En general, en la región pampeana se ha observado que el Nd (Ns+Nf) consigue explicar una buena parte de la variación del rendimiento del maíz. Sin embargo, mejores diagnósticos pueden ser obtenidos considerando otras variables como: factores de suelo limitantes, variables climáticas, factores de manejo (plagas, enfermedades, malezas), presencia de napa, disponibilidad de otros nutrientes, aporte de N mineralizado durante el ciclo del cultivo, entre otros (Correndo y García, 2014). No obstante, esta herramienta no está calibrada (ajustada) para los sistemas de producción del noreste argentino (NEA).

Más del 90% del N se encuentra en la materia orgánica (MO) del suelo (Echeverría et al., 2014), razón por cual la disminución de la MO trae aparejado una reducción de la disponibilidad de N, entre varias consecuencias negativas para el suelo. Estudios realizados en el Norte Argentino muestran pérdidas de aproximadamente 30% de la MO tras los primeros 10 años de agricultura (Villarino et al., 2017). Por otro lado, ha sido demostrado en un estudio reciente que recopiló información de 788 experimentos de N en maíz en Argentina, que cuanto mayor es el rendimiento objetivo del maíz mayor es la demanda del cultivo por este nutriente (Correndo et al., 2021).

En el NEA se ha dado un incremento de los rendimientos del cultivo de maíz en los últimos años, al mismo tiempo que los suelos presentan en general cada vez más años de agricultura (reflejado por ejemplo en menores concentraciones de MO). Esta realidad, de creciente demanda de N por maíces con mayor potencial productivo, en un escenario con caídas de MO y, por ende, de menor oferta de N

del suelo, ha llevado a un incremento del uso de la fertilización nitrogenada. No obstante, este avance en la adopción de esta práctica no ha sido acompañado del desarrollo de modelos de recomendación ajustados a las condiciones de la región.

De esta manera, los objetivos planteados inicialmente en esta Red son: (i) evaluar la respuesta a la fertilización nitrogenada en maíz en el NEA y cuáles son los factores ambientales y de manejo que más la afectan y (ii) calibrar (ajustar) umbrales críticos de N disponible en el suelo para maíz en el NEA.

Materiales y métodos

Ubicación de los experimentos

Se realizaron un total de 26 experimentos en lotes de producción en siembra directa con diferentes historiales de manejo previo, durante las campañas 2020-2021 (12 sitios) y 2021-2022 (14 sitios). Los experimentos se distribuyeron, en las provincias de Santiago del Estero, Chaco, Santa Fe y Salta (Figura 1).

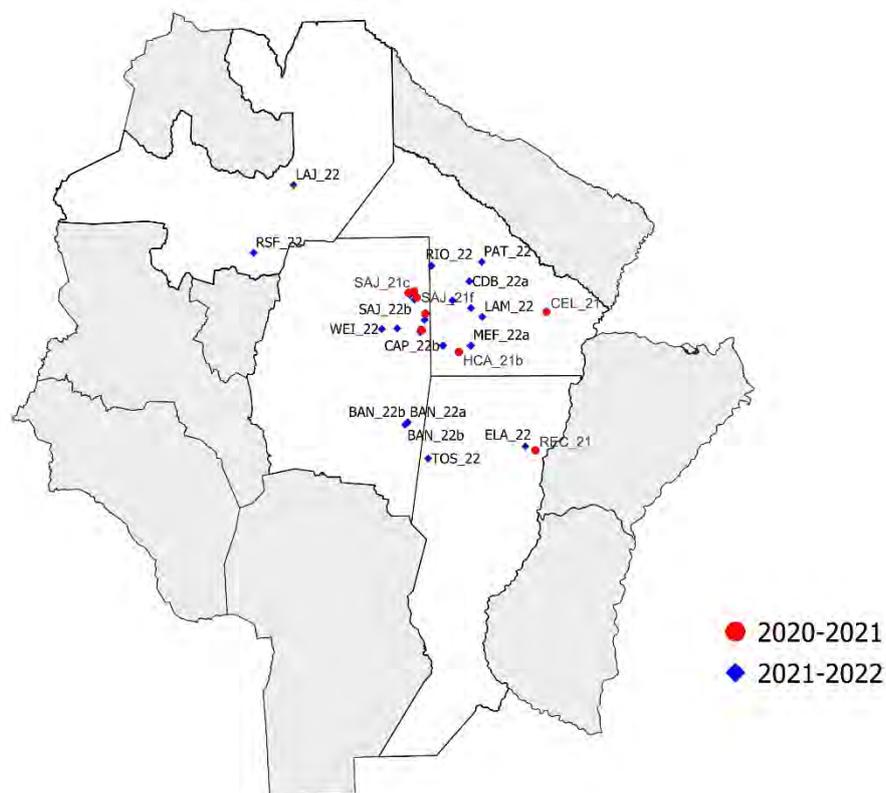


Figura 1. Sitios experimentales en Santiago del Estero, Chaco, Santa Fe y Salta.

Manejo

De los 26 experimentos evaluados en este trabajo, 19 fueron realizados en macroparcelas (MA) y 7 en microparcelas (MI). En la campaña 2020-2021, los ensayos en MI estuvieron ubicados en las localidades de Reconquista (Santa Fe), Colonia Elisa (Chaco), Hermoso Campo (Chaco) y dos en Sachayoj (Santiago del Estero), en cuanto que en la campaña 2021-2022 los únicos dos ensayos en MI se hicieron en Concepción del Bermejo (Chaco). De aquellos realizados en MA en la campaña 2020-2021, los siete que se hicieron estuvieron en localidades de Chaco (1) y Sgo. del Estero (6), mientras que en la campaña 2021-2022 hubo cinco en Chaco y siete en Sgo. del Estero (Tabla 1). Todos los ensayos se condujeron en secano.

En la campaña 2020-2021, las fechas de siembra de todos los ensayos estuvieron concentradas en tres semanas, del 23/12/20 al 13/1/21, mientras que en la campaña 2021-2022 los ensayos fueron sembrados entre el 23/12/21 y el 24/1/22. La mayor ventana de siembra en la última campaña se debió a la falta de lluvias al momento de la siembra en algunos sitios, razón por la cual algunos ensayos no considerados en este análisis fueron cosechados posterior a la fecha de cierre para recepción de los datos de este año. Por su parte, considerando las dos campañas, las densidades de siembra variaron de 48000 a 75000 pl ha⁻¹, siendo que el promedio se ubicó en 56000 pl ha⁻¹. Se utilizaron diferentes híbridos que fueron definidos por los responsables de cada sitio (Tabla 1).

El antecesor estival predominante fue soja de primera (88% de los sitios), seguido por maíz (8% de los sitios) y algodón (1 sitio). Como antecesor invernal en 54% de los sitios se hizo barbecho, en 31% hubo trigo y en un 15% se hicieron cultivos de servicio (vicia sola o consorciada con triticale).

El control de malezas e insectos se hizo siguiendo el manejo del productor. Hubo tres sitios en los que se tuvo problemas con cogollero (1 en Colonia Elisa y 2 en Concepción del Bermejo), para lo cual se debió reforzar el control con insecticida.

Diseño experimental y tratamientos

Tanto los experimentos en MA cuanto aquellos en MI fueron conducidos con un diseño

en bloques completamente aleatorizados (DBCA) con dos repeticiones como mínimo y tres repeticiones en 65% de los sitios. Las MA tuvieron un ancho mínimo de ocho surcos y un largo mínimo de 150 m, siempre teniendo en cuenta la maquinaria disponible. Muchos ensayos inclusive tuvieron anchos de 20 a 30 m y largos de 200 m (Figura 2).

En la mayoría de los ensayos los tratamientos aplicados fueron 0, 40, 80 y 160 kg N ha⁻¹. A su vez, otras dosis de N en general dentro del mismo rango fueron utilizadas en seis sitios. De acá en adelante todos los tratamientos se denominan colocando la dosis seguido de la letra N (por ej.: 0N, 40N, 80N, 160 N, etc.).

Como fuente de N se utilizaron fuentes sólidas (77% de los sitios) y líquidas (23% de los sitios), siempre adoptando la manera en que habitualmente cada productor emplea para aplicar fertilizantes. Así, las fuentes empleadas fueron Nitrodoble (50% de los sitios), urea (19% de los sitios), UAN Plus (15% de los sitios), Urea NBPT (8% de los sitios), SolMix (4% de los sitios) y UAN (4% de los sitios). El momento de aplicación de los fertilizantes fue desde presiembra hasta el estado fenológico de V8 según la escala de Ritchie y Hanway (1982). En el 38% de los ensayos se aplicaron entre presiembra y emergencia, en el 12% entre V2-V3, en el 31% entre V4-V6 y en el 19% entre V7-V8. Las formas de aplicación fueron: al voleo (42% de los sitios), incorporado (31% de los sitios) y chorreado (27% de los sitios). En los casos en que se utilizó urea esta fue incorporada para que no haya riesgo de volatilización (Tabla 1).

En seis experimentos también se evaluó el agregado de azufre (S) y cinc (Zn) en un tratamiento adicional que tenía 160 kg N ha⁻¹, más 20 kg S ha⁻¹ y 0,7 kg Zn ha⁻¹ (este último aplicada vía foliar con Zintrac® como fuente).

Tabla 1. Descripción de las características de manejo adoptadas en los sitios de experimentación.

Sitio	Fecha de siembra	Densidad de siembra (pl/ha)	Antec. Estival	Antec. Invernal	Genotipo	Fuente N	Momento Aplicación N	Forma Aplicación N
REC_21	6/1/21	50000	Algodón	Barbecho	K 9606 VIP 3	Nitrodoble	V2-V3	Voleo
CEL_21	23/12/20	48000	Soja 1°	Barbecho	NEXT 22.6 PW	Urea	Siembra	Incorporado
SAJ_21a	26/12/20	55000	Soja 1°	Barbecho	B 510 PWU	Nitrodoble	V7-V8	Voleo
SAJ_21b	26/12/20	55000	Soja 1°	Barbecho	B 510 PWU	Nitrodoble	V7-V8	Voleo
HCA_21a	2/1/21	50000	Soja 1°	Vicia**	DUO 225 PW	Nitrodoble	V4-V5	Voleo
HCA_21b	2/1/21	50000	Soja 1°	Vicia+Trít.**	DUO 225 PW	UAN	Emergencia	Chorreado
OTU_21a	2/1/21	55000	Soja 1°	Vicia	DK 72-20 VT4P	Urea NBPT	V8	Voleo
OTU_21b	2/1/21	55000	Soja 1°	Vicia	DK 72-20 VT4P	Urea NBPT	V8	Voleo
SAJ_21c	5/1/21	65000	Soja 1°	Barbecho	P 2089 PWU	UAN Plus	V6	Chorreado
SAJ_21d	6/1/21	60000	Soja 1°	Trigo	B 510 PWU	UAN Plus	V6	Chorreado
SAJ_21e	13/1/21	60000	Soja 1°	Barbecho	P 2089 PWU	UAN Plus	V7	Chorreado
SAJ_21f	9/1/21	60000	Soja 1°	Barbecho	P 2089 PWU	UAN Plus	V6	Chorreado
CDB_22a	6/1/22	57000	Soja 1°	Barbecho	B 510 PWU	Nitrodoble	V6	Voleo
CDB_22b	6/1/22	57000	Soja 1°	Barbecho	B 510 PWU	Nitrodoble	V6	Voleo
BAN_22a	27/12/21	51000	Maíz	Trigo	P 2089	Urea	Pre siembra	Incorporado
WEI_22	5/1/22	63000	Soja 1°	Trigo	DK 7320 VT4	Urea	Siembra	Incorporado
CAP_22a	8/1/22	50000	Soja 1°	Trigo	DK 7220 VT4	Nitrodoble	Pre siembra	Incorporado
CAP_22b	8/1/22	75000	Soja 1°	Trigo	DK 7220 VT4	Nitrodoble	Pre siembra	Incorporado
AER_22a	22/1/22	50000	Soja 1°	Barbecho	DK 7210 VT3	Urea	Siembra	Incorporado
AER_22b	22/1/22	50000	Soja 1°	Barbecho	B 8472 PW	Urea	Siembra	Incorporado
OTU_22a	29/12/22	58000	Soja 1°	Barbecho	Next 25.8	Nitrodoble	V3-V4	Voleo
OTU_22b	29/12/22	63000	Soja 1°	Barbecho	Next 25.8	Nitrodoble	V3-V4	Voleo
SAJ_22a	23/12/22	60000	Soja 1°	Trigo	B 510 PWU	SolMix	V4-V5	Chorreado
RIO_22	24/1/22	50000	Maíz	Barbecho	BRV 8472	Nitrodoble	Siembra	Incorporado
LOR_22	8/1/22	57700	Soja 1°	Trigo	Next 25.8	Nitrodoble	V5-V6	Voleo
COR_22	11/1/22	57700	Soja 1°	Trigo	Next 25.8	Nitrodoble	Siembra	Chorreado

REC = Reconquista. CEL = Cnia. Elisa. SAJ = Sachayoj. OTU = Otumpa. HCA = Hermoso Campo. CDB = Con. del Bermejo. BAN = Bandera. WEI = Weisburd. CAP = Gral. Capdevilla. AER = Aerolito. RIO = Río Muerto. LOR = Loro Blanco. COR = Corzuela. * Dato no informado. ** Cultivo de servicio pastoreado.



Figura 2. Ensayos en macroparcelas en Gral. Capdevilla (Chaco) en lote con un sector de abra, señalado en rojo (CAP_22a) y otro de monte, de la mitad para abajo (CAP_22b). Cada ensayo con tres repeticiones y cinco tratamientos (0N, 40N, 80N, 160N y 160N+S+Zn). **Fotos:** Ing. Agr. Wilson Schultz (HyH) y equipo de Experta (AGD).

Las muestras de suelo se tomaron en momentos próximos a la siembra, en las profundidades de 0-20, 20-40 y 40-60 cm para caracterización de la fertilidad. Para determinar agua útil (AU) se muestreo hasta un mínimo de 1 m y siempre que fuera posible hasta 2 m. Los análisis de suelos se realizaron en su mayoría en el laboratorio Ag Lab (La Carlota, Córdoba).

Respuesta a la fertilización

Para evaluar si hubo o no respuesta significativa a la fertilización nitrogenada se lo hizo utilizando los rendimientos obtenidos, realizando un análisis de varianza en cada sitio con el software Infostat 2020 (Di Rienzo et al., 2020).

Calibración del umbral crítico

Se realizó la calibración del umbral crítico (UC). Para ello, el UC de N fue determinado al hacer el ajuste del rendimiento y/o del rendimiento relativo (RR) con el N disponible (Nd). El Nd se obtuvo al sumar el N del suelo (N de nitratos de 0-60 cm) disponible a la siembra más el N aportado con el fertilizante que varía según la dosis utilizada en cada tratamiento. El cálculo del rendimiento relativo se hizo empleando la siguiente ecuación (Álvarez et al., 2015):

$$RR (\%) = (\text{rendimiento del tratamiento} / \text{rendimiento más alto del sitio}) \times 100$$

Se ajustó la función lineal-plateau que se define de la siguiente manera:

$$Y = a + b x \quad x < C$$

$$Y = P \quad x \geq C$$

Siendo que:

Y = rendimiento o rendimiento relativo

a = ordenada al origen

b = eficiencia en el uso del Nd (o respuesta del rendimiento o RR a la disponibilidad de N)

x = los valores de Nd

C = umbral crítico de Nd (este valor es el punto a partir del cual no hay respuesta en rendimiento o RR al incremento de Nd)

P = plateau (son todos los valores de Nd (x) en que Y se vuelve constante)

Resultados

Caracterización de los sitios

En la Tabla 2 se presenta una síntesis de las características ambientales de los sitios donde se condujeron los experimentos en las campañas 2020-2021 y 2021-2022. Existe una gran amplitud de años de agricultura entre los sitios, desde un mínimo de 2 años hasta un máximo de 80 años. El 50% de los lotes tenía entre 14 y 30 años, siendo que el 25% de los lotes más jóvenes tenían menos de 14 años. Entre los suelos que están mapeados hay principalmente molisoles y en menor medida entisoles y alfisoles. Dos sitios fueron ambientes de abra (OTU_21b y CAP_22a) y el resto monte.

Considerando ambas campañas, la cobertura inicial varió entre 0 y 98% (Tabla 2). Debido a las elevadas temperaturas en el NEA, es común encontrar poca cobertura en los lotes. Esto se vio en un 25% de los sitios, en los que la cobertura inicial fue menor al 35%, lo cual hace con que se

elevadas temperaturas en el NEA, es común encontrar poca cobertura en los lotes. Esto se vio

pierda más rápidamente la humedad, entre varios aspectos negativos. Cabe resaltar que, en general, los lotes donde se condujeron los ensayos en la campaña 2020-2021 tenían menos cobertura (la mitad de los lotes de esa primera campaña tenía entre 10 y 15%) que los lotes de la campaña 2021-2022 (un 75% de los sitios de la segunda campaña tenía como mínimo 56% de cobertura). De esta manera, no solamente se tuvo mayores porcentajes de suelo cubierto al inicio de la campaña 2021-2022, sino que también esta tendencia fue más uniforme entre los diferentes sitios, hecho que se percibe por una menor distribución de los datos en la Figura 3.

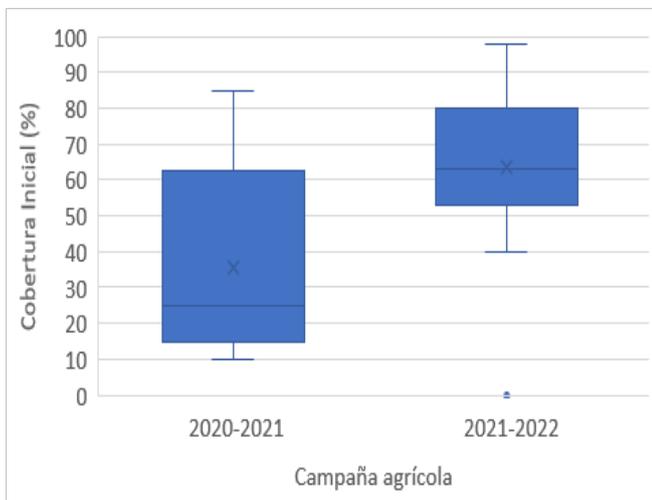


Figura 3. Porcentaje de cobertura inicial observada en los sitios donde se condujeron los experimentos en las dos campañas agrícolas.

La gran mayoría de los sitios tiene 50% o más de limo, con valores que van de 45 a 79% para este tamaño de partículas. La arena fue el tamaño

de partícula que presentó mayor variabilidad entre los sitios, observándose desde 1% como mínimo hasta 37% como máximo. La mitad del total de los sitios tenía una concentración de P (Bray 1) igual o superior a las 39 ppm, indicando que en general los suelos estaban muy bien provistos de P, pero también hubo cuatro lotes con menos de 20 ppm, lo cual es para destacar ya que en general a la región NEA se la considera una zona con buenos niveles de este nutriente. Cuando se utilizaron arrancadores en sitios con bajo P, el N contenido en dichos fertilizantes se sumó al N del suelo.

Los valores de pH estuvieron entre 5,5 y 7,5 (promedio = 6,9), con una tendencia a encontrar menores valores en sitios con más años de agricultura (Figura 4).

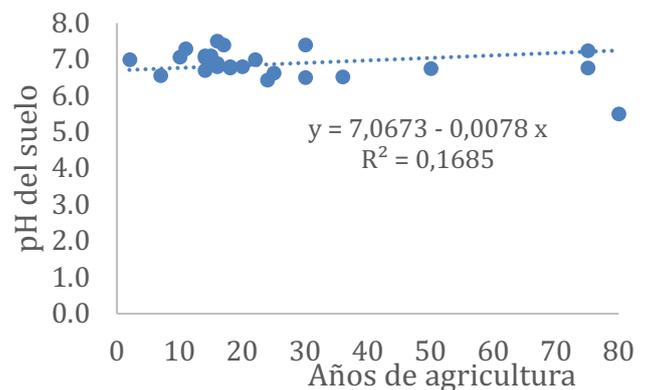


Figura 4. Valores de pH del suelo de los sitios donde se condujeron los experimentos en las dos campañas agrícolas, ploteados según los años de agricultura de cada sitio.

Tabla 2. Descripción de las características ambientales de los sitios de experimentación.

Sitio	Años de agricultura	Cob-Inicial (%)	Suelo	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	pH	SB (%)	MO (%)	P (ppm)	Ns 0-60 (kg ha ⁻¹)	Nan (ppm)	Lluvias (mm)	AU 0-1%	AU 0-2%	Napa
REC_21	25	10	Argiudol acuertico	25	55	20	6,6	65	1	6	45	36	562	80	70	No
CEL_21	80	15	Hapludol típico	10	79	11	5,5	39	1,6	20	118	23	442	60	60	No
SAJ_21a	36	15	Argiudol acuico	26	64	10	6,5	58	2,3	10	135	34	431	55	63	No
SAJ_21b	16	15	Argiudol acuico	34	58	8	6,9	66	3,7	49	139	46	431	55	63	No
HCA_21a	75	85	Durustol típico	18	60	22	7,2	59	2,2	75	59	41	570	40	30	No
HCA_21b	75	35	Durustol típico	34	52	14	6,8	15	1,9	73	82	25	570	40	30	No
OTU_21a	14	70	*	28	63	10	7,1	94	2,9	67	92	47	509	38	18	No
OTU_21b	24	40	*	26	60	14	6,4	77	2,9	27	187	38	509	26	15	No
SAJ_21c	18	*	*	1	68	31	6,8	99	2,6	58	73	37	340	51	40	No
SAJ_21d	10	*	*	*	*	*	7,1	97	3	70	87	44	300	*	*	No
SAJ_21e	20	*	*	3	70	27	6,8	99	2,7	55	83	64	300	*	*	No
SAJ_21f	16	*	*	7	60	33	7,5	99	2,6	29	71	51	324	*	*	No
CDB_22a	7	56	Ustifluent mólico	21	53	27	6,6	99	2,5	51	163	*	432	69	35	No
CDB_22b	14	56	Ustifluent mólico	23	52	25	6,7	100	2,4	41	113	*	432	73	37	No
BAN_22a	30	70	Haplustol típico	21	59	20	6,5	91	2	25	88	*	285	19	38	Si
WEI_22	11	80	*	29	51	20	7,3	69	2,5	19	120	*	303	31	17	No
CAP_22a	50	92	Haplustol Fluventico	14	62	25	6,8	63	2,7	44	30	*	260	61	68	Si
CAP_22b	22	98	Haplustol Fluventico	17	64	19	7	67	2,9	51	48	*	260	76	70	Si
AER_22a	15	80	*	20	60	20	7,1	93	2,2	36	111	*	408	80	64	No
AER_22b	30	80	*	19	60	22	7,4	80	2,1	27	85	*	408	79	69	No
OTU_22a	18	61	Argiustol	22	60	18	6,8	95	4	38	105	*	526	70	52	No
OTU_22b	15	63	Argiustol	18	63	19	6,9	100	3,8	30	97	*	526	46	36	No
SAJ_22a	17	0	*	22	62	16	7,4	100	2,5	39	69	*	450	65	59	No
RIO_22	2	*	*	37	45	18	7	100	2,8	42	297	*	342	44	41	No
LOR_22	14	40	Durustalf	28	53	19	7,1	90	2,3	41	85	*	659	90	52	No
COR_22	16	50	*	*	*	*	6,8	100	2,7	32	56	*	393	*	*	No

REC = Reconquista. CEL = Cnia Elisa. SAJ = Sachayoj. OTU = Otumpa. HCA = Hermoso Campo. CDB = Con. del Bermejo. BAN = Bandera. WEI = Weisburd. CAP = Gral. Capdevilla. AER = Aerolito. RIO = Río Muerto. LOR = Loro Blanco. COR = Corzuela. Sitios con 21 son de la campaña 2020-2021 y con 22 de la 2021-2022. AU = agua útil en % de 0-1 m y de 0-2 m. * Dato no informado

Con el transcurrir de los años de agricultura también se percibe una disminución del porcentaje de saturación de bases (SB) (Figura 5) y de la materia orgánica (MO) (Figura 6) en los sitios de los ensayos, hechos que posiblemente estén relacionados con balances negativos de nutrientes (exportación de nutrientes sin o con baja reposición). Sin embargo, también se destacan positivamente algunos sitios con entre 15-20 años de agricultura cuyos suelos se encuentran con 3,7 a 4,0% de MO, producto de un manejo que promueve mejores balances de carbono como la incorporación de cultivos de servicio y mayor porcentaje de gramíneas en la rotación.

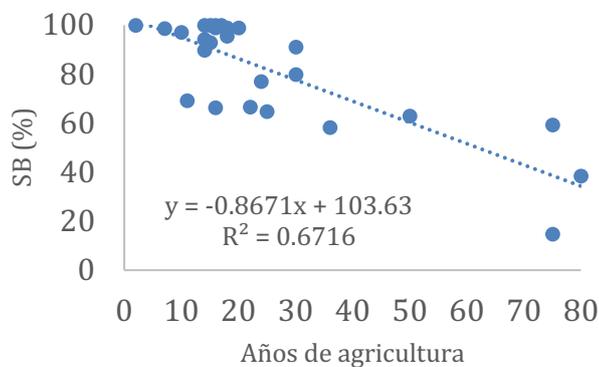


Figura 5. Valores de porcentaje de saturación de bases (SB) de los sitios donde se condujeron los experimentos en las dos campañas agrícolas, ploteados según los años de agricultura de cada sitio.

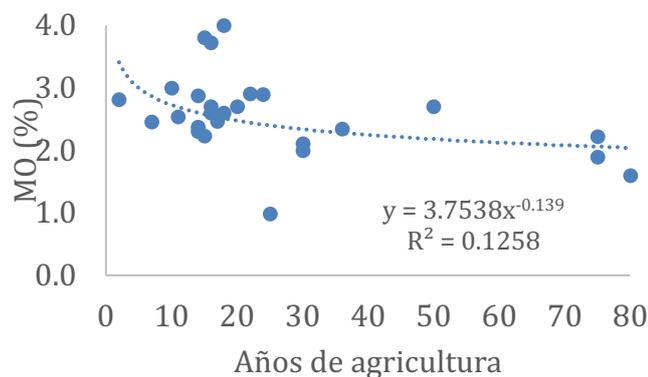


Figura 6. Valores de materia orgánica (MO) de los sitios donde se condujeron los experimentos en las dos campañas agrícolas, ploteados según los años de agricultura de cada sitio.

Los niveles de N de nitratos a la siembra (N suelo 0-60 cm) fueron muy variables y exploraron un rango de 30 a 297 kg N ha⁻¹ considerando todos los sitios de las dos campañas (Tabla 2). En la

Figura 7 se observa que el valor promedio de N suelo 0-60 cm (señalado con una "x" en las cajas) fue similar en ambas campañas (aproximadamente 100 kg N ha⁻¹), pero en la campaña 2020-2021 hubo una tendencia a tener más valores altos en relación a la 2021-2022.

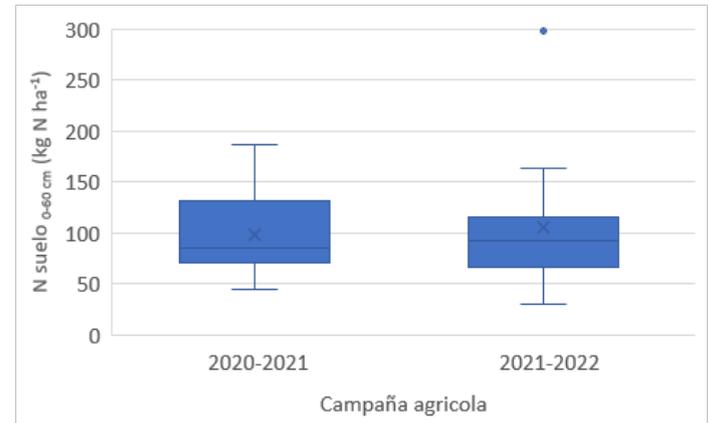


Figura 7. N suelo (0-60 cm) a la siembra en los sitios donde se condujeron los experimentos en las dos campañas agrícolas.

A la fecha de esta publicación se disponía solamente de los datos de Nan de la primera campaña. Lo que se observa en relación a los valores de Nan analizados hasta el momento es que estos exploran un rango de variabilidad que va desde 23 a 64 ppm, con un promedio de 40,5 ppm (Tabla 2).

Teniendo en cuenta las dos campañas agrícolas, las precipitaciones durante el periodo de siembra a cosecha variaron entre 260 y 659 mm. El porcentaje de agua útil (AU%) que había disponible en la mitad de los sitios de la campaña 2020-2021 fue menor en las profundidades de 0-1 m (40-55%) y 0-2 m (30-63%) cuando comparado con la campaña 2021-2022 (0-1 m = 46-76 m; 0-2 m = 37-64%). En cuanto a presencia de napa, solamente tres sitios de la campaña 2021-2022 tenían, y estos se encontraban en Bandera (Sgo. del Estero) y Gral. Capdevila (Chaco) (Tabla 2).

Rendimientos explorados

En la campaña 2020-2021 los rendimientos variaron entre 2631 y 13250 kg ha⁻¹ en Reconquista y Sachayoj (SAJ_21b), respectivamente. En esta primera campaña, el rendimiento promedio fue 7675 kg ha⁻¹ (Figura 8). Ya en la campaña 2021-2022 el rendimiento promedio fue 8582 kg ha⁻¹, con rendimientos variando entre 3852 y 11688 kg ha⁻¹ en Concepción del Bermejo (CDB_22a) y Gral. Capdevila (CAP_22b), respectivamente (Figura

9). De esta manera, se observa que la campaña 2021-2022 tuvo no solamente un rendimiento promedio que superó en 907 kg ha⁻¹ a la anterior, sino que también el “piso de rendimiento” de la segunda campaña fue 1221 kg ha⁻¹ mayor al de la primera. Por lo tanto, los rendimientos

explorados en la segunda campaña tuvieron una variabilidad importante, pero dentro de un rango de rendimientos superior a los obtenidos en la primera campaña.

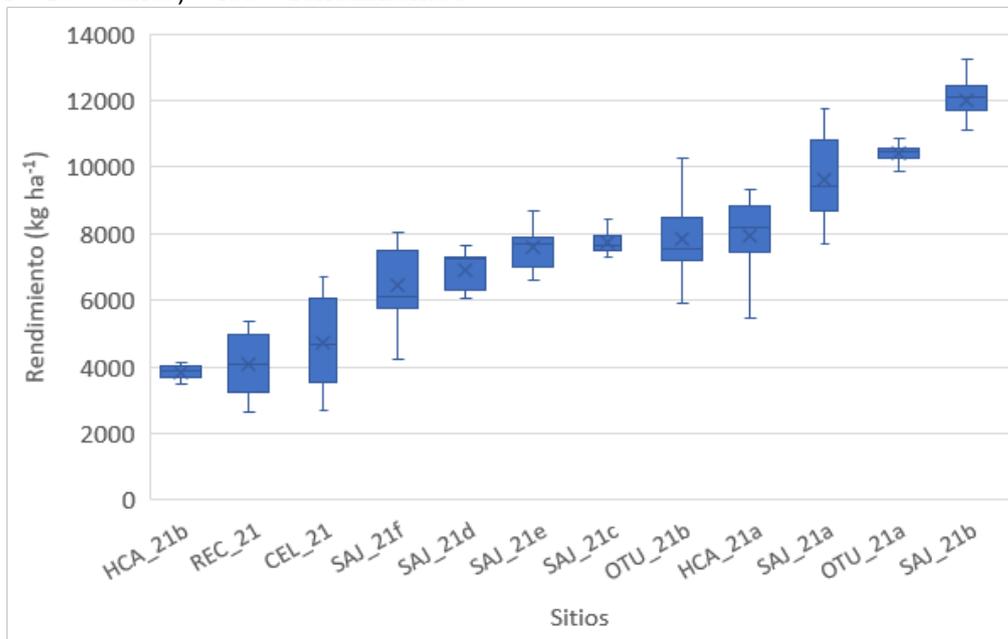


Figura 8. Rendimientos obtenidos en los 12 sitios de la campaña 2020-2021. Las cajas muestran los rendimientos medios y las líneas horizontales (bigotes) los rendimientos extremos de cada sitio.

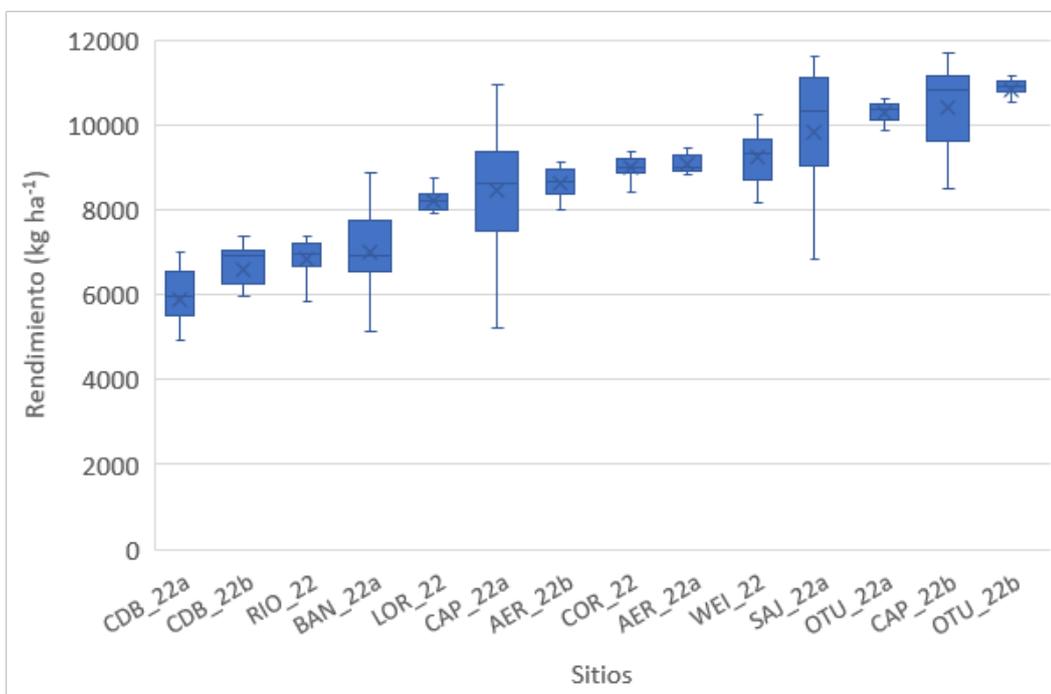


Figura 9. Rendimientos obtenidos en los 14 sitios de la campaña 2021-2022. Las cajas muestran los rendimientos medios y las líneas horizontales (bigotes) los rendimientos extremos de cada sitio.

Respuesta a la fertilización

En la campaña 2020-2021 la fertilización nitrogenada generó un efecto positivo en 3 de los

12 sitios experimentales ($p < 0,05$; Figura 10). Las diferencias significativas de esta campaña se dieron en tres sitios de la localidad de Sachayoj.

Los tres tuvieron como antecesores soja de primera (antecesor estival) y barbecho (antecesor invernal) (Tabla 2). Las respuestas

significativas obtenidas variaron entre 1308 kg ha⁻¹ (19%) y 2655 kg ha⁻¹ (32%) en los sitios SAJ_21e y SAJ_21b, respectivamente.

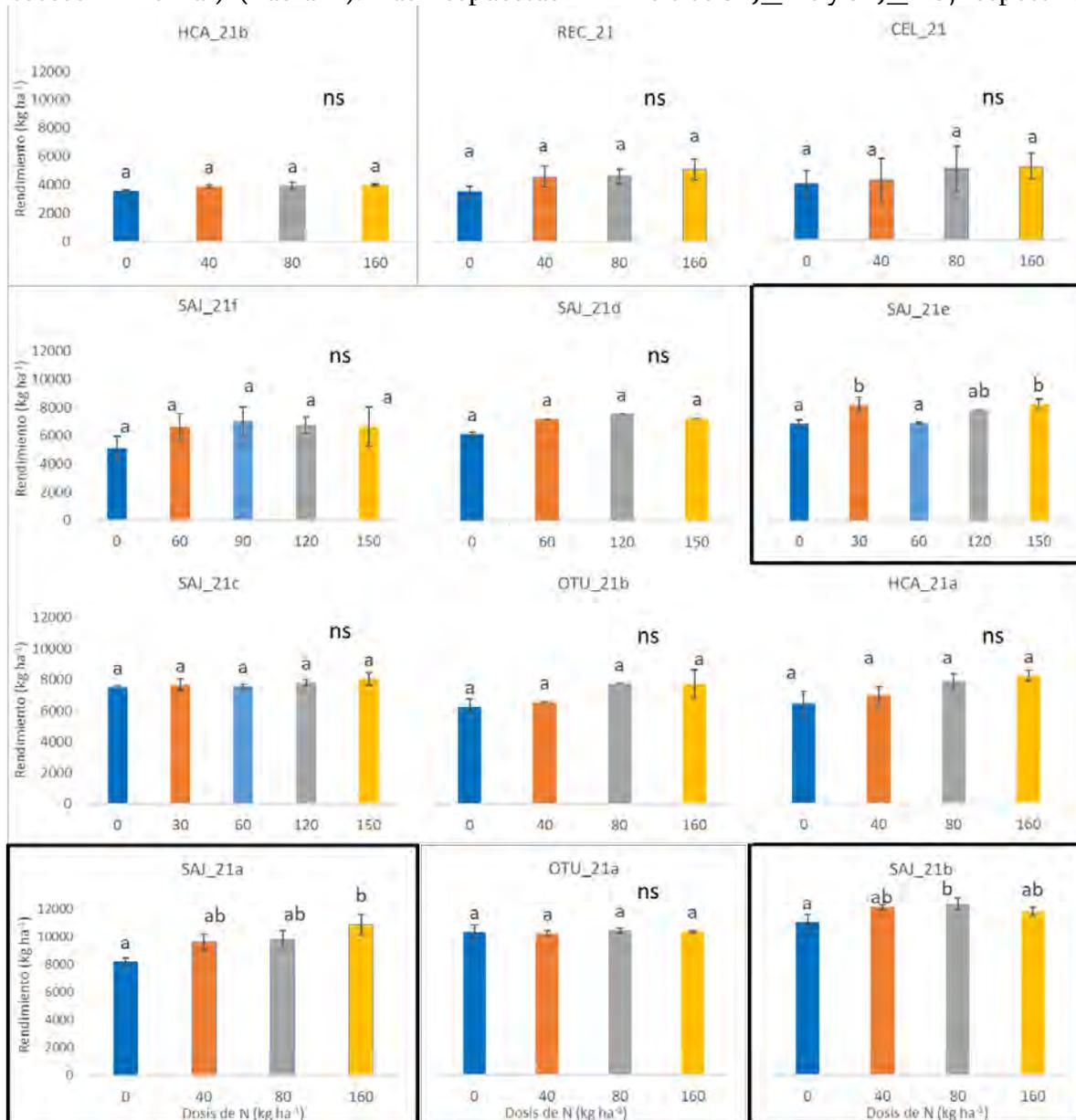


Figura 10. Variabilidad de rendimientos obtenidos en los 12 ensayos de la campaña 2020-2021 en función de las dosis de N aplicadas en cada sitio. Letras distintas entre tratamientos indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre dosis de N según el test LSD Fisher.

En la campaña 2021-2022 se encontró un aumento significativo del rendimiento en 8 de los 14 sitios ($p < 0,05$; Figura 11). Las diferencias significativas de esta campaña se obtuvieron todas en sitios con macroparcelas que se encontraban en las siguientes localidades: Gral. Capdevila (CAP_22a y CAP_22b), Corzuela (COR_22), Aerolito (AER_22b), Weisburd

(WEI_22), Sachayoj (SAJ_22a) y Otumpa (OTU_22a y OTU_22b). Los ocho tuvieron como antecesor estival soja de primera y como antecesor invernal en cinco de ellos trigo en cuanto que en tres fue barbecho (Tabla 2). Las respuestas significativas obtenidas variaron de: 430 kg ha⁻¹ (4%) a 4349 kg ha⁻¹ (61%) en los sitios OTU_22a y SAJ_22a, respectivamente.

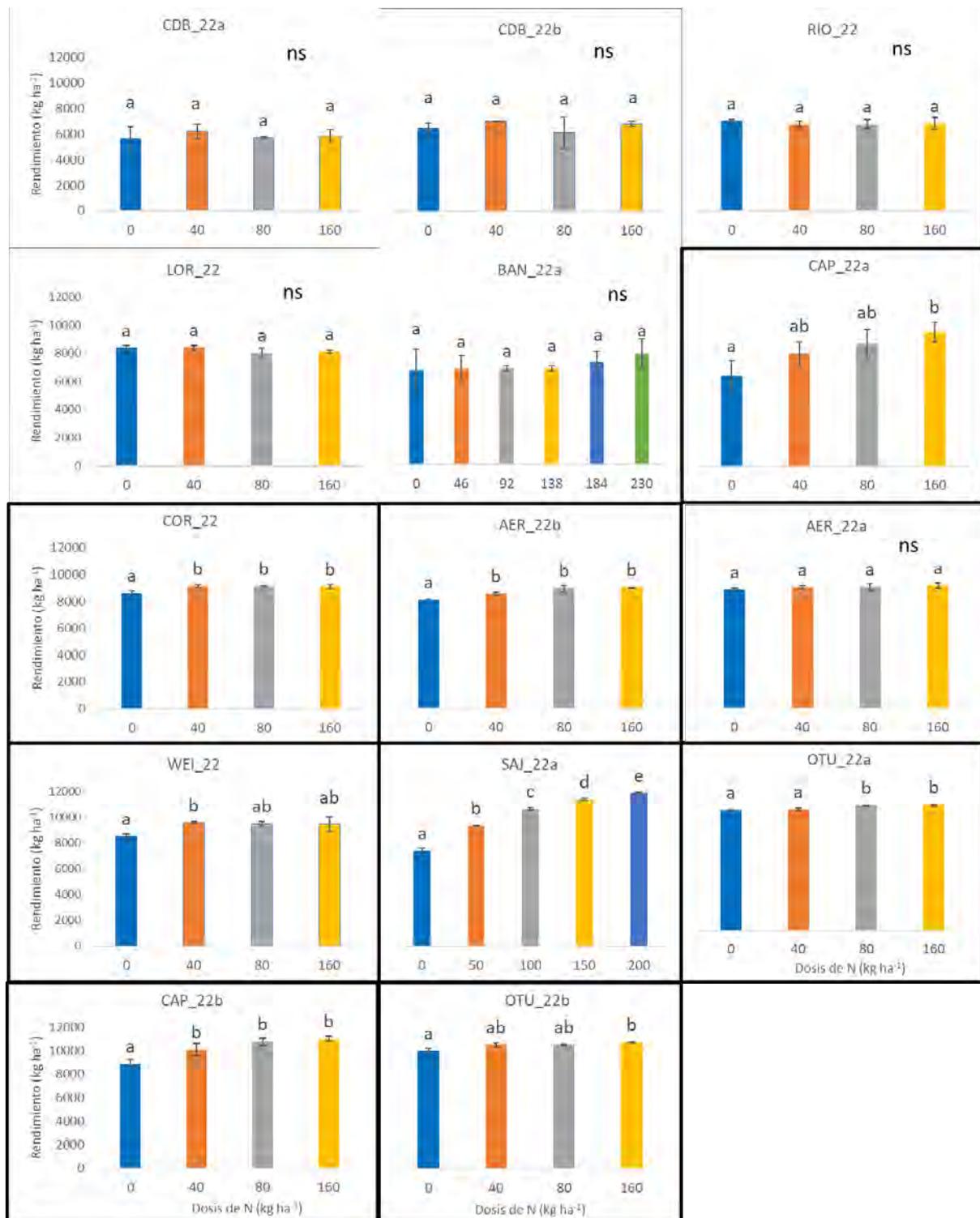


Figura 11. Variabilidad de rendimientos obtenidos en los 14 ensayos de la campaña 2021-2022 en función de las dosis de N aplicadas en cada sitio. Letras distintas entre tratamientos indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre dosis de N según el test LSD Fisher.

Cabe destacar que los sitios con respuesta significativa tuvieron un rendimiento promedio mínimo de 8433 kg ha⁻¹ (CAP_22a), siendo que de los nueve sitios por encima de ese rendimiento promedio sólo uno (AER_22a) no tuvo respuesta significativa (Figura 11).

Al comparar ambas campañas queda evidente que en la 2021-2022 hubo un mayor porcentaje de sitios con respuesta significativa (57%) en relación a los que la tuvieron en la 2020-2021 (25%). Esto podría deberse a diferentes motivos tales como: menor cantidad de N en el suelo (0-

60 cm) a la siembra y mayor cobertura del suelo en la segunda campaña (Figuras 7 y 3); así como menor cantidad de sitios en ambientes de bajos rindes y mayor cantidad de sitios con mayor porcentaje de agua útil en el suelo a la siembra en la segunda campaña con relación a la primera (Figuras 8 y 9; Tabla 2). Como mencionado anteriormente, en la campaña 2021-2022, los sitios con respuesta significativa estuvieron en ambientes de medios a superiores, lo cual lleva a pensar que en algunos sitios con bajos rendimientos es probable que haya otras variables de manejo que se deban ajustar antes que la fertilización. Un ejemplo de ello son los sitios de Concepción del Bermejo (CDB_22 a y CDB_22b), en los cuales la utilización de un material susceptible al cogollero (refugio) posiblemente haya comprometido los rindes por el ataque de dicha plaga. Situación similar a esta se observó en Colonia Elisa (CEL_21) en la primera campaña donde el rendimiento se vio comprometido por el ataque de la misma plaga, así como una fuerte seca y problemas con spiroplasma. Aspectos como estos son algunas de las dificultades bióticas y abióticas que se presentan a menudo en ensayos en el NEA, motivo por el cual requieren un adecuado manejo con los debidos cuidados para controlar estas posibles complicaciones. Además, es un motivo por el cual, siempre que sea posible, se recomienda que se hagan tres repeticiones en lugar de dos.

La elección del material más adecuado para cada sitio también podría afectar la probabilidad de respuesta significativa de un ensayo de fertilización nitrogenada. En este sentido, llama la atención que, en los sitios ubicados en Aerolito, los cuales estuvieron uno a la par del otro, un ensayo tuvo respuesta significativa (AER_22b) y el otro no (AER_22a), siendo que la única diferencia entre ambos fue el híbrido utilizado. En la región Pampeana, por ejemplo, se ha observado diferencia de respuesta a la fertilización nitrogenada según genotipos (Gambin et al., 2016 citado por Coyos et al., 2018).

Otra práctica de manejo que también puede influir en la probabilidad de tener respuesta o no, es elegir la densidad de siembra adecuada para cada híbrido, en cada ambiente, y prestar especial atención también a la uniformidad de siembra. Con relación a este aspecto, por ejemplo, vale mencionar que en ensayos donde se cruzaron dosis crecientes de N por distintas densidades de siembra, realizados en la Chacra Sachayoj en la campaña 2020-2021, se observó que en general

densidades mayores a 60000 pl ha⁻¹ mostraron una elevada tendencia al quebrado del material allí utilizado (datos no presentados, Morand comunicación personal). Todo lo comentado anteriormente lleva a tener muy presente el hecho de que la nutrición del cultivo es apenas uno de los aspectos importantes a manejar adecuadamente para lograr elevados rendimientos.

En los seis experimentos donde se evaluó adicionalmente un tratamiento con agregado S y Zn (160N+S+Zn) no se encontró efecto significativo del mismo ni en su interacción con el sitio ($p > 0,05$).

Calibración del umbral crítico

Inicialmente la calibración del umbral crítico se hizo con el conjunto de datos de rendimiento relativo en función del Nd (N suelo 0-60 cm + N fertilizante), considerando todos los sitios de las dos campañas, ajustando un umbral crítico por campaña (Figura 12; Tabla 3).

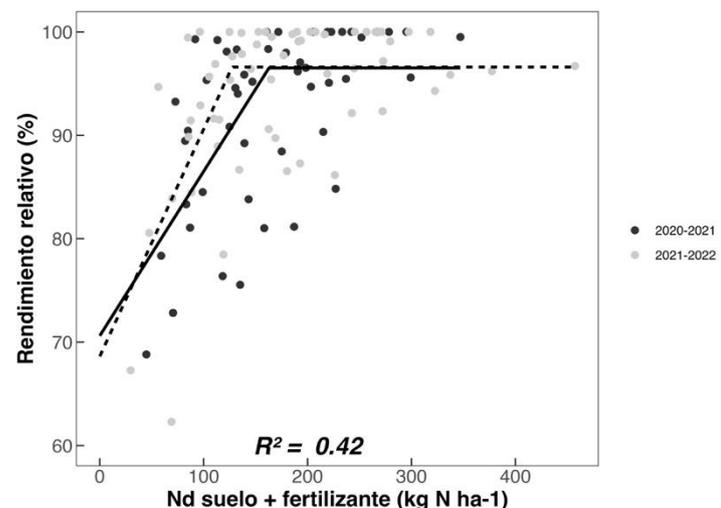


Figura 12. Rendimiento en función del nitrógeno disponible a la siembra (Nd = N suelo 0-60 cm + N fertilizante) de los sitios de las campañas 2020-2021 y 2021-2022.

Tabla 3. Parámetros de las funciones lineal-plateau entre nitrógeno disponible a la siembra (Nd = N suelo 0-60 cm + N fertilizante) y rendimiento relativo (%) para 12 sitios de la campaña 2020-2021 y los 14 sitios de la campaña 2021-2022.

Año	Parámetro	Valor	D.E.	P valor
2020-2021	a	70,6	4,3	<0,001
	b	0,16	0,04	<0,001
	C	163	15,4	<0,001
2021-2022	a	68,6	5,1	<0,001
	b	0,22	0,05	<0,001
	C	127	11,6	<0,001

Sin embargo, al ajustar un modelo, considerando todos los sitios de ambas campañas agrícolas, se observa que el R^2 obtenido es levemente inferior (Figura 13) al que se obtuvo cuando se separó el set de datos por campaña (Figura 12). Así fue posible llegar a un único umbral crítico de $147 \text{ kg Nd ha}^{-1}$ con los datos de los primeros dos años de la Red (Tabla 4). En la Tabla 4 se presentan los parámetros del modelo ajustado en la Figura 13. El desvío estándar (D.E.) del parámetro C nos indica que el rango crítico de N disponible o intervalo de confianza está entre 137 y $157 \text{ kg Nd ha}^{-1}$.

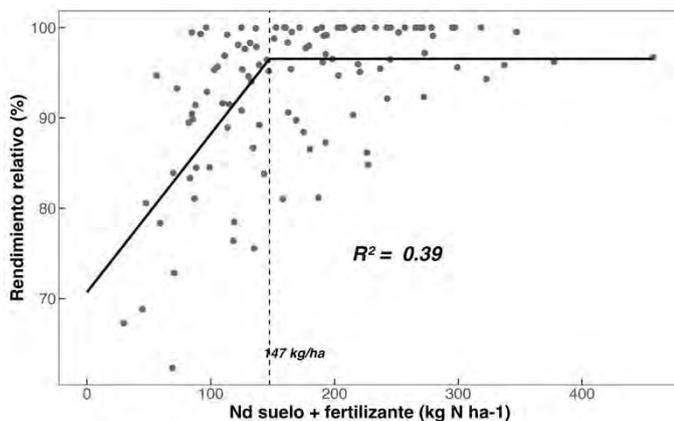


Figura 13. Rendimiento relativo en función del nitrógeno disponible a la siembra ($\text{Nd} = \text{N suelo}_{0-60 \text{ cm}} + \text{N fertilizante}$) para 26 sitios durante las campañas 2020-2021 y 2021-2022.

Tabla 4. Parámetros de la función lineal-plateau entre nitrógeno disponible a la siembra ($\text{Nd} = \text{N suelo}_{0-60 \text{ cm}} + \text{N fertilizante}$) y rendimiento relativo (%) para 26 sitios durante las campañas 2020-2021 y 2021-2022.

Parámetro	Valor	D.E.	P valor
a	70,7	3,25	<0,001
b	0,18	0,03	<0,001
C	147	10,1	<0,001

En la búsqueda de obtener umbrales críticos por ambientes, se procedió a clasificar los sitios en tres rangos de ambientes que fueron: ambientes de rendimiento menor a 6000 kg ha^{-1} , ambientes con rendimientos de 6000 a 9000 kg ha^{-1} y ambientes cuyos rendimientos fueran superiores a 9000 kg ha^{-1} . Segmentación de ambientes por franjas de rendimientos como la mencionada anteriormente han sido utilizadas por Mistrorigo & Valentinuz (2004) y por Díaz

Valdez et al. (2020) en Entre Ríos. Según lo expresado por algunos productores y ensayistas que participaron de esta Red de Ensayos, en la región los rindes de indiferencia para maíz con fertilización nitrogenada están aproximadamente entre 5000 y 7000 kg ha^{-1} , dependiendo del lugar, con lo cual considerar un límite inferior de 6000 kg ha^{-1} (promedio de los rindes de indiferencia) se justifica por este motivo al igual que fue planteado por los autores de los trabajos realizados en Entre Ríos. Al igual que se consideró en el trabajo de Díaz Valdez et al. (2020), el rendimiento utilizado como criterio para clasificar en estos rangos de ambientes fue el promedio obtenido en los tratamientos ON (testigo) de cada sitio, considerando que el mismo es una medida de todos los factores ambientales (edáficos y climáticos) cuando no se aplica N.

En la Figura 14 se muestra la relación entre los rendimientos absolutos y el Nd para los 26 sitios de las campañas 2020-2021 y 2021-2022, separados por ambientes ($< 6000 \text{ kg ha}^{-1}$; $6000-9000 \text{ kg ha}^{-1}$; $> 9000 \text{ kg ha}^{-1}$). El ajuste de los modelos lineal-plateau que se obtuvieron para los tres ambientes fueron muy buenos ($R^2 = 0,70$), mejor inclusive que el obtenido utilizando RR y sin separar por ambientes (Figura 13).

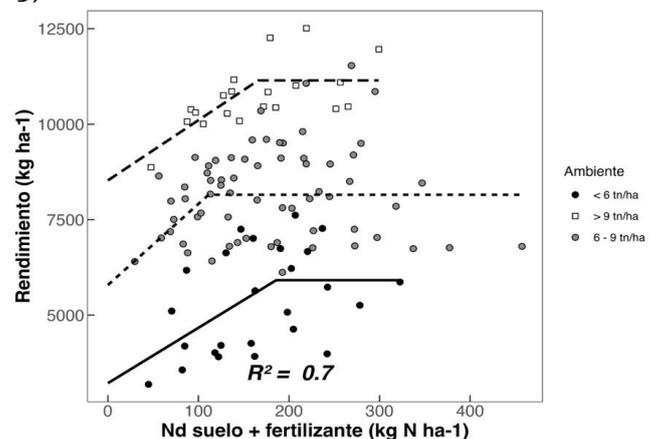


Figura 14. Rendimiento en función del nitrógeno disponible a la siembra ($\text{Nd} = \text{N suelo}_{0-60 \text{ cm}} + \text{N fertilizante}$) para 26 sitios de las campañas 2020-2021 y 2021-2022, separados en tres ambientes.

Al hacer esta estratificación, los umbrales críticos obtenidos fueron de 186 , 111 y $166 \text{ kg Nd ha}^{-1}$ para los ambientes: $< 6000 \text{ kg ha}^{-1}$, $6000-9000 \text{ kg ha}^{-1}$ y $> 9000 \text{ kg ha}^{-1}$, respectivamente. En el ambiente de menor potencial es probable que los sitios considerados hasta el momento tengan otras limitantes más importantes que el N. En lo que se refiere a la eficiencia de uso del N

(kg grano por kg Nd; parámetro b), esta variable fue significativa únicamente para el ambiente > 9000 kg ha⁻¹ con un valor de 15,8 kg grano kg Nd⁻¹ (Tabla 5). Sin embargo, la variabilidad de los datos y la no significancia de las pendientes (parámetro b) observada en los ambientes con rendimientos menores a 9000 kg ha⁻¹ señalan que se requiere un mayor análisis de los datos y ampliar el set de datos con dos campañas más, la pasada (2022-2023) que también fue seca, y la próxima (2023-2024) que según los pronósticos sería más húmeda. Probablemente la variabilidad observada puede deberse a la calidad de los sitios, la historia de los mismos (años de agricultura) y a la mineralización.

Tabla 5. Parámetros de la función lineal-plateau entre nitrógeno disponible a la siembra (Nd = N suelo 0-60 cm + N fertilizante) y rendimiento relativo (%) para 26 sitios de las campañas 2020-2021 y 2021-2022, separados en tres ambientes.

Ambiente	Parámetro	Valor	D.E.	P valor
	a	3218	1082	<0.01
< 6000 kg ha ⁻¹	b	14,5	8,7	ns
	c	186	52,9	<0.01
6000-9000 kg ha ⁻¹	a	5788	1212	<0,001
	b	21,25	14,5	ns
	C	111	26,1	<0,001
> 9000 kg ha ⁻¹	a	8527	812	<0,001
	b	15,8	7,1	<0,05

El aporte de N por mineralización puede ser contemplado para mejorar los ajustes de los modelos incorporando para ello un estimador de la mineralización que es el Nan. Datos preliminares de esta Red de Nutrición del Norte Argentino presentados en el Congreso 2022 de Aapresid han mostrado para el análisis exclusivo de los sitios de la campaña 2020-2021 que hubo una mejora en el ajuste de los modelos. Para el próximo informe de esta Red, ya con los datos de Nan de las dos campañas, se podrá evaluar, en el total del conjunto de datos obtenidos hasta la fecha, cómo evoluciona el ajuste del modelo cuando se tiene en cuenta también el N aportado por mineralización a lo largo de la campaña (comúnmente llamado “la película”) sumado al N determinado en el suelo a la siembra (la “foto inicial”; Reussi Calvo et al, 2020).

Por último, cabe destacar que este es un análisis preliminar con los primeros datos obtenidos en dos campañas de esta Red de Nutrición. Las respuestas y los umbrales obtenidos hasta el momento deben ser considerados aún exploratorios. La continuación del proyecto con información de las dos próximas campañas (2022-2023 y 2023-2024) proporcionará un número de evaluaciones y un mayor rango de variación en condiciones ambientales.

Consideraciones finales

- Se analizó la respuesta a N en 26 sitios de maíz durante las campañas 2020-2021 y 2021-2022.
 - Los rendimientos variaron entre 2631 y 13250 kg ha⁻¹.
 - Hubo una respuesta significativa a la fertilización en 11 sitios, que se concentraron principalmente en la campaña 2021-2022.
 - Las respuestas se dieron en sitios con antecesor invernal trigo o barbecho, principalmente con mayores porcentajes de cobertura y agua útil a la siembra.
 - Preliminarmente se observa un umbral crítico único de Nd de 137-157 kg N ha⁻¹

Agradecimientos

A los Dres. Fernando O. García y Nahuel I. Reussi Calvo por su apoyo constante y sus aportes desde el principio de esta Red y hasta la actualidad.

A todos los ensayistas y contratistas por su dedicación y trabajo para llevar adelante los ensayos de esta Red.

A las empresas Yara y Experta (AGD) por la financiación de esta Red.

Bibliografía

- Álvarez, R.; F. Gutiérrez Boem; G. Rubio. 2015. Diagnóstico de la fertilidad y recomendación de fertilización. En: Álvarez R. Fertilidad de suelos y fertilización en la Región Pampeana. 1a Ed. Editorial Facultad de Agronomía: 263-274.
- Correndo, A. & F. García. 2014. Bases de la nutrición del cultivo de maíz. Respuesta a la fertilización con nitrógeno, fósforo, azufre y zinc. IPNI Cono Sur. Capítulo 6. Maíz. Manual CREA.
- Correndo A.; F. Gutiérrez Boem; F.O. García, et al. 2021. Attainable yield and soil texture as drivers of

- maize response to nitrogen: A synthesis analysis for Argentina. *Field Crops Research* 273.
- Coyos, T.; L. Borrás & B.L. Gambin. 2018. Site-specific covariates affecting yield response to nitrogen of late-sown maize in Central Argentina. *Agron. J.* 110 (4), 1544–1553.
- Díaz Valdez, S.T.; F.O. García & O.P. Caviglia. 2020. Calibración de umbrales críticos de nitrógeno disponible en el suelo para maíz tardío en Entre Ríos. *Ciencia del Suelo* 38(1):106–120.
- Di Rienzo, J.A.; F. Casanoves; M.G. Balzarini; L. González; M. Tablada; C.W. Robledo. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- Echeverría, H.E.; H.R. Sainz Rozas & P.A. Barbieri. 2015. Maíz y sorgo. En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds.) *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. 2da Edición. Cap. 14.
- Gambin, B.L., T. Coyos, G. Di Mauro, L. Borrás & L.A. Garibaldi. 2016. Exploring genotype, management, and environmental variables influencing grain yield of late-sown maize in central Argentina. *Agric. Syst.* 146:11–19.
- Maddonini, G.A.; R.A. Ruiz; P. Villariño & I. García de Salomon. 2003. Fertilización en los cultivos para grano. En: *Producción de granos: bases funcionales para su manejo*, Eds.: Satorre et al. Capítulo 19. 783 p.
- Mistrorigo, D. & O.R. Valentinuz. 2004. Fertilización de maíz en siembra directa en suelos molisoles y vertisoles del oeste de Entre Ríos. *Revista Científica Agropecuaria* 8: 99–107.
- Reussi Calvo, N.I.; N. Diovisalvi; A. Berardo; F.O. García. 2020. Del paper al lote. ¿Cuándo, cómo y por qué debería fertilizar mis maíces? Laboratorio FERTILAB, FCA-INTA Balcarce, CONICET.
- Ritchie, S.W. & J.J. Hanway. 1982. How a corn plant develops. *Spec. Rep.* 48. Iowa State University of Science and Technology, Coop. Ext. Serv., Ames, Iowa.
- Salvagiotti, F.; H. Pedrol; J. Castellarin; J. Capurro; J.C. Felizia; A. Gargicevich & N. Trentino. 2002. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada en maíz. I - Relación entre la respuesta en rendimiento y la disponibilidad de nitrógeno a la siembra. Para Mejorar la Producción. INTA Oliveros. 20:67–70.
- Villarino, S.H.; G.A. Studdert; P. Baldassini; M.G. Cendoya; L. Ciuffoli; M. Mastrángel & G. Piñeiro. 2017. Deforestation impacts on soil organic carbon stocks in the Semiarid Chaco Region, Argentina, *Sci Total Environ.* 575:1056–1065.

Manejo de la fertilización en cultivos de granos en la Región de La Pampa arenosa

Mirian Barraco
barraco.miriam@inta.gob.ar

La región de la Pampa Arenosa cubre una superficie de aproximadamente 54.980 km² en el área central de Argentina, abarcando el noroeste de Buenos Aires, noreste de La Pampa y los extremos, sudeste de Córdoba y Sudoeste de Santa Fe. Es una extensa llanura, con escasa pendiente en sentido oeste-este, donde predominan consociaciones de suelos de diferente aptitud productiva. Los ambientes de mayor productividad se manejan bajo agricultura continua desde mediados de la década del 90 con predominio de trigo como cultivo de invierno y soja, maíz y en menor proporción girasol como cultivos estivales. Los suelos son predominantemente Molisoles, de texturas superficiales arenosas a franco arenosas, con moderada capacidad de almacenaje de agua, alta permeabilidad, y con bajos a medios contenidos de materia orgánica (MO).

La intensificación de la agricultura y la falta de rotaciones con pasturas perennes han producido una disminución de los niveles de carbono de los suelos al igual que en el resto de la región pampeana y disminuciones significativas de algunos nutrientes como fósforo (P), calcio (Ca), zinc (Zn), entre otros y una disminución de valores de pH (Sainz Rosas et al., 2013 y 2019).

El monitoreo de los valores de pH, contenidos de MO y principales nutrientes resulta clave para el adecuado diagnóstico de la nutrición en los principales cultivos de la región. Por ejemplo, en el caso de P un relevamiento de 1010 lotes agrícolas entre las campañas 2019-2022 mostró que el 90% de las muestras evaluadas se encuentran por debajo de los umbrales de trigo y maíz y un 60% por debajo de los umbrales para el cultivo de soja (Figura 1), (Barraco y col. inédito), siendo este nutriente junto con el N los que mayormente limitan la productividad de los cultivos.

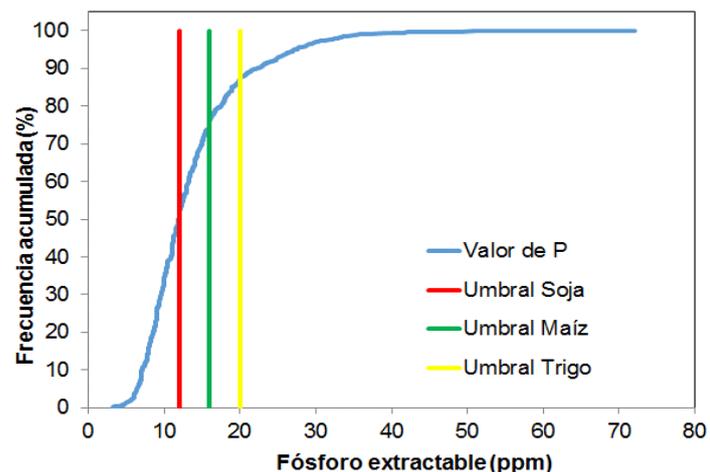


Figura 1. Distribución de frecuencia acumulada de los contenidos de fósforo extractable de suelos en la Pampa Arenosa, (n=1010 muestras).

Con respecto al azufre (S), dado las texturas arenosas y los contenidos de MO, en general los valores son bajos, aunque las respuestas a su agregado resultan menos frecuentes. En algunos casos la presencia de napas cercanas con sales con S provee cantidades suficientes, por lo que resulta de interés sumar este indicador al manejo nutricional de los cultivos. Con respecto al contenido de Zn la disponibilidad media es de alrededor de 1 ppm, con valores entre 0,7 y 2 ppm, por lo que resulta necesario su cuantificación en los primeros 20 cm de suelo.

A continuación, se discuten los aspectos más significativos relacionados al manejo de la fertilización en los principales cultivos de la región.

Trigo

En ausencia de limitantes hídricos, el N constituye el principal nutriente limitante para la normal producción del cultivo. El ajuste de las necesidades de fertilización nitrogenada se basa en la evaluación de la oferta de N de nitratos determinada previo a la siembra mediante el muestreo de los primeros 40 cm de profundidad. El N objetivo ($N_{\text{suelo}} + N_{\text{del fertilizante}}$) se estima según el "rendimiento alcanzable" definido por la productividad del ambiente (tipo y espesor de suelo, contenidos de arena y/o MO) y los

pronósticos climáticos. En ambientes de alta productividad el N objetivo varía entre 150-170 kg N/ha, mientras que en sitios con rendimientos menores el umbral se encuentra entre los 100-120 kg N/ha. Estudios recientes sugieren que la incorporación de un indicador adicional como el N anaeróbico podría contribuir a la mejora de la caracterización del potencial productivo de los ambientes y mejorar el ajuste de las necesidades de fertilización. Las aplicaciones fraccionadas de N, en general, no conducen a mayores rendimientos con respecto a la fertilización completa en el momento de la siembra, pero permiten incrementos en los contenidos de proteínas de los granos (Barraco y col., 2008). Dada la escasa probabilidad de precipitaciones durante el período invernal es recomendable la aplicación de N en los primeros estadios del cultivo (hasta inicio de macollaje). Recientemente se ha incrementado el uso de maquinarias que permiten la incorporación de N previo a la siembra, lo cual favorece su utilización en años de escasas precipitaciones.

En lo que respecta a P, estudios desarrollados en suelos Hapludoles Típicos y Énticos muestran una respuesta media al agregado de P de un 13%, con una eficiencia media de uso de 22 kg grano kg P aplicado⁻¹ para dosis de entre 20 y 24 kg de P ha⁻¹ (Alvarez & Barraco, 2017). La fertilización con P en cereales de invierno permite el uso de mayores dosis de fertilizante y resulta clave en sistemas con niveles muy bajos de este nutriente que requieren de estrategias de reconstrucción.

La respuesta al agregado de S es más errática (30-40% de los sitios evaluados) y de menor magnitud con respecto a N y P (3,4%), observándose en los sitios deficientes respuestas adicionales en el cultivo de soja de segunda. El agregado de S generalmente se realiza en mezclas con P en fertilizantes arrancadores al momento de la siembra y/o se puede complementar con la aplicación de N en los primeros estadios de los cultivos.

En ausencia de otros nutrientes limitantes, la fertilización con cloruro de potasio (dosis de 100 a 150 kg ha⁻¹) permite incrementos en los rendimientos de trigo del orden del 5% sobre el control sin fertilización en el 60% de los ensayos evaluados (Díaz-Zorita y col. 2007).

Maíz

Actualmente el cultivo de maíz se siembra en fechas tempranas y tardías en proporciones casi equivalentes y es muy baja la participación de siembras de segunda sobre cultivos de trigo o cebada. Con respecto a las siembras tempranas los antecesores más frecuentes son soja de primera y de segunda, mientras que en cultivos de siembra tardía los principales antecesores son soja o cultivos de cobertura (CC), lo que dependiendo de la especie utilizada condiciona significativamente la disponibilidad de algunos nutrientes como N.

En siembras tempranas los suelos presentan bajos contenidos N, como consecuencia de sus texturas arenosas, sumado a escasas precipitaciones y bajas temperaturas durante los meses de barbecho (mayo a setiembre). Algunos estudios bajo condiciones de moderadas precipitaciones primavero-estivales muestran eficiencias de uso de N similares según diferentes momentos de aplicación (siembra versus estadios de V4-V6 de los cultivos); sin embargo, los niveles de N en el suelo previo a la siembra no se relacionan con los niveles de respuesta del cultivo de maíz a la fertilización nitrogenada, requiriéndose de la inclusión de otras estimaciones para su predicción (Barraco y Díaz-Zorita, 2005). El contenido de N de nitrato (0 a 60 cm) en el estadio de V6 de los cultivos ha resultado en una herramienta útil para discriminar entre sitios con diferente probabilidad de respuesta. Un estudio que recopiló los resultados de 38 ensayos realizados entre 2001 y 2012 mostró un umbral ($N_{\text{suelo}} + N_{\text{del fertilizante}}$) de 157 kg N ha⁻¹, con eficiencias de uso de N de 30,5, 23,0 y 20,5 kg de grano kg de N aplicado⁻¹ para dosis de fertilización menores a 50, entre 50 y 100 y mayores de 100 kg de N ha⁻¹, respectivamente (Barraco et al., 2016). Evaluaciones más recientes, desarrolladas en sitios con más de 25 años de agricultura continua muestran umbrales superiores, indicando la necesidad de ajustar herramientas de diagnóstico bajo las actuales condiciones de producción (Figuras 2), (Girón et al., 2020). En estos trabajos se analiza la interacción N * Densidad de siembra observándose una mayor contribución del ajuste de N a la mejora de los rendimientos por sobre la selección del número de plantas.

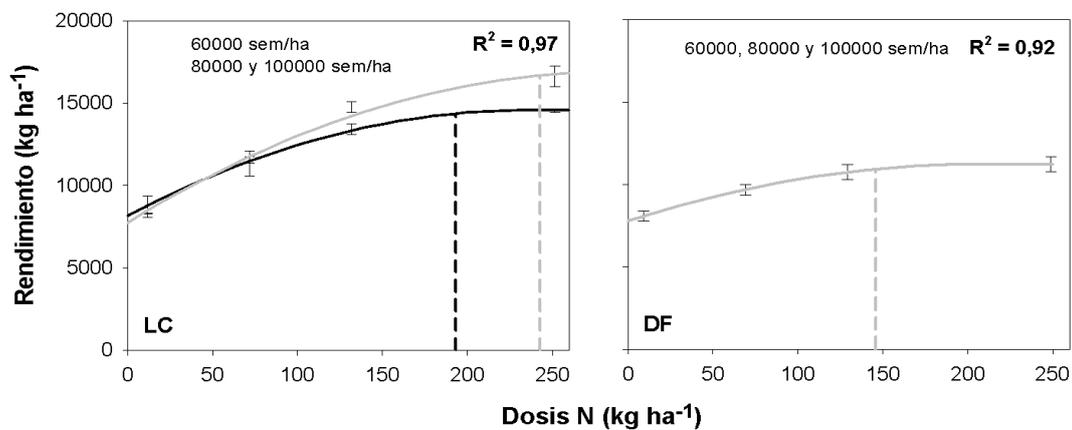


Figura 2. Relación entre dosis de N y rendimiento de maíz según diferentes densidades de siembra en dos sitios de la Pampa Arenosa.

En siembras tardías los contenidos de N de nitratos resultan variables no solo por la calidad de los sitios, sino también en función del cultivo antecesor. Generalmente lotes con antecesor soja (barbecho de 6 a 8 meses) o sobre vicia como CC muestran mayores contenidos de N y menor respuesta a la fertilización, mientras que lotes con gramíneas como CC o mezclas de leguminosas y gramíneas pueden presentar inmovilización y requieren del agregado de mayores dosis de N (Figura 3), (Barraco et al., 2022).

En cuanto al agregado de P resultados de varios estudios muestran una eficiencia de uso de P (EUP) promedio de 80 kg grano kg P aplicado⁻¹, con una respuesta promedio del 17% de aumento respecto de los testigos sin P, mientras que en S la respuesta media a su agregado fue en promedio de 3,6%. De manera similar al trigo la fertilización con S se realiza en mezclas en fertilizantes arrancadores o junto al N en aplicado postergadas de N.

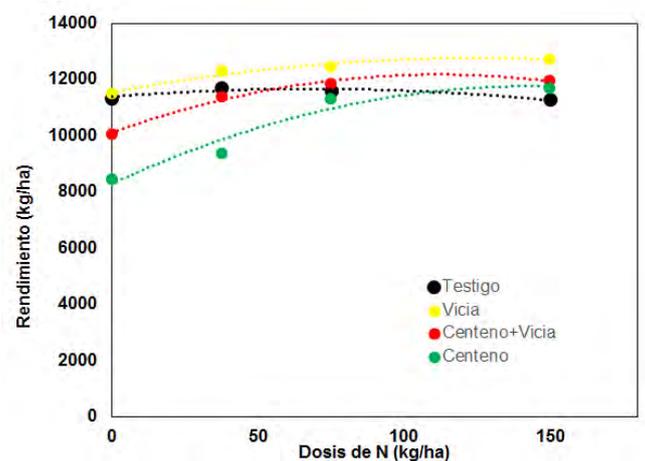


Figura 3: Rendimientos de maíz según especies de cultivos de cobertura y dosis de nitrógeno (N).

Si bien en Zn se observaron resultados similares con aplicaciones realizadas al momento de la siembra o en estadíos de V6, es más frecuente su uso en fertilizantes mezclas arrancadores.

Soja

El N es indiscutiblemente un elemento cuyos aportes desde el suelo son insuficientes para la normal producción de soja. Sin embargo, su demanda es cubierta eficientemente por la FBN en simbiosis con rizobios. Estudios locales muestran alta ocurrencia de sitios con respuestas a la inoculación alcanzando incrementos medios del 6,9%, con aportes de N por FBN de entre 48 a 64%, siendo mayores al incrementarse el crecimiento del cultivo y sus rendimientos.

Con respecto a P analizando una red de 15 ensayos se observó una respuesta media de un 6,1% (+ 229 kg ha⁻¹) y los rendimientos de los cultivos fertilizados fueron superiores a los no fertilizados en todo el rango de productividad evaluada (Barraco et al., 2020).

En otro estudio, considerando 2 secuencias de cultivos (soja continua y soja en rotación con cultivos de cobertura invernal) en un sitio con niveles de P inicial de 12,6 ppm, se observó la disminución en los valores del P bajo el manejo continuado sin fertilización durante 8 años alcanzando 7,8 ppm, mientras que, en ese período, el suelo bajo el manejo del cultivo con fertilización alcanzó una disponibilidad de 23,3 ppm. Otros estudios en ensayos de larga duración en la EEA General Villegas muestran que la inclusión de un cultivo de cobertura invernal con aportes de moderadas dosis de P contribuye a mejorar los balances de P en secuencias con alta participación de soja (Barraco, inédito).

En cuanto a la forma de aplicación de fertilizantes, dada la susceptibilidad de la soja a efectos fitotóxicos, es recomendable evitar la aplicación en contacto directo con las semillas, sobre todo en suelos de textura más arenosa. Estos riesgos son independientes de la fuente de fertilizante fosfatado y son mayores en condiciones de bajo contenido de humedad de los suelos (Girón y Barraco, 2022a). En base a esto, aconsejamos la aplicación separada de la línea de siembra (2-3 cm), el manejo de la oferta de P a partir de aplicaciones de este elemento en otros cultivos de la rotación o de aplicaciones al voleo anticipadas a la siembra del cultivo.

Tal como se observa en otras áreas de la región pampeana, en el noroeste de Buenos Aires en los suelos agrícolas se redujeron los niveles extractables de Ca y de Mg como resultado de la intensificación productiva sin reposición de estos elementos. Estudios preliminares muestran una tendencia a moderadas mejoras en los rendimientos de soja con aplicaciones foliares de calcio en estados reproductivos (R3), (Barraco et al., 2020). Además, en un Hapludol típico representativo de sitios agrícolas en producción, la aplicación de enmiendas básicas tales como calcita y dolomita en dosis de 1000 kg ha⁻¹ aplicadas en superficie un mes antes de la siembra de soja aumentaron 10% la concentración de Ca intercambiable del suelo y 17% los rendimientos de soja (Girón et al., 2016).

Un estudio reciente en un cultivo de soja sembrado sobre un centeno de cobertura, mostró un incremento del 16% en los rendimientos

cuando se adicionaron en forma conjunta P, S y Boro, indicando la importancia de una adecuada nutrición balanceada (Girón & Barraco, 2022b).

Comentarios Finales

La intensificación de los actuales sistemas de producción no solo contribuye a una mejora de los rendimientos de los cultivos en la región, sino también va acompañada de una mayor extracción de nutrientes.

La generalizada deficiencia de P con un 25% de lotes con contenidos menores a 9 ppm alerta sobre la necesidad de incrementar el aporte de este nutriente. Dada la mayor tolerancia a la aplicación incorporada de dosis mayores de fertilizantes en cereales de invierno sería recomendable su uso en estos cultivos, dado que aplicaciones al voleo resultan menos eficientes en el corto plazo.

Por otro lado, el descenso de los valores de pH de los suelos y una disminución de otros nutrientes como Ca, Mg, B y Zinc en algunos sectores de la región hace necesario intensificar su monitoreo y evaluar su contribución con respecto a aplicaciones de base con N, P y S.

Referencias

- Alvarez, C; Barraco, M. 2017. Capítulo 10. Manejo del cultivo de trigo en diferentes regiones. 10 c, Noroeste de Buenos Aires y este de La Pampa. En G. Divito y F. García (e.). Manual del Cultivo de Trigo. 1a ed. International Plant Nutrition Institute (IPNI). Acassuso, Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-46277-3-5. pp.130-135.
- Barraco, M; C. Alvarez; P. Girón; M. Aguirre. 2022. Impacto del manejo de cultivos de cobertura sobre la productividad de maíz tardío. XXVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 15 al 18 de noviembre de 2022. Buenos Aires, Argentina.
- Barraco, M; Girón, P; Macchiavello, A; Díaz Zorita, M; Miranda W; Álvarez, C. 2020. Fertilización y rendimientos de soja en la Pampa Arenosa. Notas Agrícolas Pampeanas 2020. N°2. Pp 41-44.
- Barraco, M; Díaz- Zorita, M; Miranda, W; Álvarez, C. 2016. Fertilización con N, P y S en la Pampa Arenosa. Revista Horizonte A, Magazine de las Ciencias Agrarias y los Agronegocios. Especial Maíz. Año 12. N°81. pp 14-18.
- Barraco M, M. Díaz-Zorita, C. Álvarez, C. Scianca. 2008. Fraccionamiento de nitrógeno en cultivos de

- trigo de la región de la pampa arenosa. VII Congreso Nacional de trigo, V Simposio Nacional de Cereales de siembra otoño-invernal, I Encuentro del MERCOSUR. 2 al 4 de julio de 2008. Santa Rosa, La Pampa.
- Barraco, M; Girón, P; Macchiavello, A; Díaz Zorita, M; Miranda W; Álvarez, C. 2020. Fertilización y rendimientos de soja en la Pampa Arenosa. Notas Agrícolas Pampeanas 2020. N°2. Pp 41-44.
- Barraco, M; Díaz-Zorita, M. 2005. Momento de fertilización nitrogenada de cultivos de maíz en Hapludoles Típicos. Revista Ciencia del Suelo. 23(2): 197-203.
- Díaz-Zorita, M; G. Duarte; M.V. Fernández Canigia y C. Brambilla. 2007. Uso de cloruro de potasio y producción de trigo en la pampa arenosa. Informaciones Agronómicas 34: 10-16
- Girón P & M. Barraco. 2022. Aumentos de rendimiento de soja. Fertilizamos? XXVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 15 al 18 de noviembre de 2022. Buenos Aires, Argentina.
- Girón P & M. Barraco. 2022a. Cuáles son los factores que influyen en la fitotoxicidad por fertilizantes en soja y maíz. XXVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 15 al 18 de noviembre de 2022. Buenos Aires, Argentina.
- Girón, P; Macchiavello, A; Barraco, M; Ottaviano, C; Ferro, D; Vasquez, M. 2016. Aplicación de correctores básicos y fertilizantes cálcicos/magnésicos en el cultivo de soja. XXV Congreso Argentino de la Ciencia Del Suelo. Río Cuarto, Argentina. Del 27 de junio al 1 de julio de 2016.
- Girón; P; Barraco, M; Miranda, W; Scroffa, M; Lista, J; Courregues, B. 2020. Efecto de la densidad y la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento de maíz. Memoria Técnica 2019-2020. Estación Experimental Agropecuaria General Villegas. 21-23.
- Sainz Rozas, H. R., M. Eyherabide, H.E. Echeverría, P.A. Barbieri, H.P. Angelini, G.E. Larrea, G.N. Ferraris, y M.R. Barraco. 2013. ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos? En Simposio Fertilidad 2013. Mayo de 2013. Rosario, Santa Fe. Argentina
- Sainz Rozas, HR; M Eyherabide; G Larrea; N Martínez Cuesta; H Angelini; N Reussi Calvo & N Wyngaard. 2019. Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana. Simposio de fertilidad. FERTILIZAR. Rosario, 8 y 9 de mayo de 2019.

Nutrición de cultivos en el sudeste de Buenos Aires: avances y desafíos

Guillermo A. Divito^{1,2} y Juan P. Martínez¹

1 EDM. Estudio Agronómico. 2. Regional Necochea de Aapresid

En los últimos años nos ha tocado manejar cultivos que tienen mayor demanda de nutrientes, determinada por un mayor potencial de rendimiento, en suelos que tienen menor capacidad de proveerlos (Sainz Rozas et. al., 2019). Cubrir dicha diferencia procurando cumplir con los “4 Requisitos del Manejo Responsable de Nutrientes” (4Rs) (IPNI, 2013) representa un desafío.

En el sudeste de Buenos Aires hemos avanzado en el conocimiento y puesta en práctica de tecnologías de procesos e insumos que permiten un mejor manejo de la nutrición. Sin embargo, observamos disparidades entre cultivos, tanto por incentivos productivos y/o económicos, como por la aparición de nuevas estrategias de producción en algunos de ellos (ej. maíces de siembra tardía, uso de cultivos de servicios como antecesor, etc.). Es entonces relevante realizar una revisión del estado actual del nivel de adopción zonal de herramientas que permitan cumplir con los 4Rs.

Trigo y cebada son pilares de la rotación en la región (ocupan 40 a 60% de las secuencias) debido a que el ambiente permite explorar elevados rendimientos de manera estable. Ambos cultivos presentan parámetros de calidad que condicionan el precio de venta del grano, que dependen directamente de la nutrición, especialmente nitrogenada. Debido a ello, son los cultivos que mayor atención reciben de parte de productores/asesores a la hora de definir la fertilización. Las dosis de nitrógeno (N) como fertilizante surgen, en general, del análisis de la disponibilidad de nitrato en el suelo y en un 91% de los casos dicha dosis se fracciona en aplicaciones que se realizan entre inicio y fin de macollaje (datos Aapresid J. M. Fangio), tal como sugieren trabajos locales realizados hace casi dos

décadas (Reussi Calvo y Echeverría, 2006). Sin embargo, el monitoreo del estatus nitrogenado del cultivo a partir de encañazón para definir si es necesario intervenir nuevamente es una materia aún pendiente, que menos del 5% de los productores emplea (datos Aapresid J.M. Fangio). Por otra parte, se destaca que, aunque la deficiencia a azufre (S) ya ha sido reportada hace más de 10 años en la zona (Reussi Calvo et. al., 2008), en las últimas campañas sólo un 56% de los lotes fueron fertilizados con este nutriente (datos Aapresid J.M. Fangio). Es evidente entonces que deberíamos empezar a considerar el diagnóstico y eventual corrección de la deficiencia si pretendemos cerrar brechas de rendimiento. Finalmente, deberíamos empezar a prestar atención a trabajos recientes realizados en la zona, que reportan deficiencias de zinc (Zn) en trigo (Martínez Cuesta et al., 2022).

El **maíz** también se ha constituido en un cultivo relevante en las empresas de la zona, debido en parte a la mejora en precio respecto de otros cultivos de verano, principalmente soja, y en parte a las mejoras en rendimiento que se han logrado por ajustes en manejo (densidad, fecha de siembra, genética., etc.). Análisis recientes que contrastan base de datos de productores y modelos de nutrición zonales indican que, en general, se están empleando dosis de N por debajo de las necesarias para obtener los rendimientos que permite el ambiente (Divito et al., 2020). Se destaca también el avance de la práctica de siembra tardía, al igual que en otras regiones del país. En este caso surge la necesidad de contar con calibraciones locales de las metodologías de diagnóstico y fertilización con N, debido a que gran parte de los modelos empleados surgen de extrapolaciones desde otras zonas o de información surgida desde empresas,

que aportan modelos empíricos simples (Ej. Cultivo, Bayer). Es necesario entonces profundizar en la investigación de los procesos que explican diferencias en la relación suelo-cultivo entre maíces tempranos y tardíos a fin de poder manejar de manera más eficiente la nutrición. La fertilización con S se ha adoptado en un 19% de los casos, mientras que la nutrición con Zn aún no se encuentra difundida.

Por otra parte, la adopción de cultivos de servicios (CS) es creciente en el sudeste de Buenos Aires, y un nicho importante que cubren es el de los barbechos que anteceden a la siembra de maíz. En este sentido, si bien existe información local que caracteriza la respuesta a N de dicho cultivo con distintos CS como antecesor (Crespo et al. 2022a; Carciochi et al., 2022), la misma resulta aún insuficiente y/o carece de robustez, en especial si se considera la diversidad que puede presentar un CS en mezcla de especies, biomasa acumulada, relación C/N, etc.

Otro nicho que ocupa el maíz en las rotaciones de la zona es como cultivo de segunda, principalmente luego de trigo y cebada. Su inclusión también creció desde 2015 ligado al aumento de la relación de precio maíz/soja, aunque también contribuyeron los semilleros al ofrecer más y mejores híbridos de ciclo corto. Se destaca aquí que trabajos recientes llevados adelante por Crespo et al., (2022b) permitieron establecer umbrales de respuesta a N para el cultivo. Dichos modelos marcan un nivel crítico de N (N-nitrato en 0-60 cm de profundidad + N del fertilizante) de 22 kg por tonelada de rendimiento objetivo. Además, estos permitieron establecer diferencias en la eficiencia de uso del N de hasta un 86% al pasar a fuentes de urea menos volátiles como el nitrato de amonio calcáreo, ambos aplicados al voleo.

El cultivo de **girasol** también se ha visto favorecido con el cambio en las relaciones de precios de granos ocurrido en 2015. Actualmente ocupa entre el 20 y el 35% de la superficie en las rotaciones de la zona debido al buen margen bruto y a que es un muy buen antecesor para cultivos de invierno (por su fecha de cosecha temprana, bajo volumen de residuos, etc.). Para

este cultivo se han ajustado modelos zonales de nutrición nitrogenada que indican valores críticos de N (N-nitrato en 0-60 cm de profundidad + N del fertilizante) de 37 kg por tonelada de rendimiento objetivo (Diovisalvi et al., 2019). Sin embargo, del total de lotes sembrados por productores socios de Aapresid (Regional Mar del Plata J.M. Fangio) solo un 36% recibieron fertilización con el nutriente. Considerando la disponibilidad media del nutriente a la siembra y los potenciales de rendimiento explorados en la zona, hay indicios para suponer que existe una brecha de rendimiento a reducir incrementando la cantidad de lotes fertilizados con N.

Finalmente, y para todos los cultivos antes mencionados, se destaca la baja adopción de tecnologías de manejo por ambientes que existe hoy en la región (30% de los lotes asesorados, sobre un total de 37.000 ha). Esto limita el ajuste del manejo de la nutrición, en particular en lo referido a la dosis de fertilizantes a aplicar considerando la disponibilidad de nutrientes y la demanda a partir del rendimiento alcanzable.

**Los datos surgidos de la Regional Juan Manuel Fangio de Aapresid corresponden a análisis de campaña de lotes de producción, campañas 2017/18 a 2021/22 para trigo y cebada (1080 casos/lotés) y campañas 2019/20 a 2021/22 para maíz (725 casos/lotés) y girasol (593 casos/lotés).*

Bibliografía

- Carciochi, W. D., Massigoge, I., Lapaz Oliveira, A., Reussi Calvo, N. I., Cafaro La Menza, F., Sainz Rozas, H. R., ... & Ciampitti, I. A. 2021. Cover crop species can increase or decrease the fertilizer-nitrogen requirement in maize. *Agronomy Journal*, 113(6), 5412-5423.
- Crespo, C., Corral, R. A., Diez, S. N., Delgado, S. G., Domínguez, G. F., Agostini, M. A., ... & Studdert, G. A. 2022a. Green bridge crops to manage corn nitrogen nutrition in the Southeastern Argentinean Pampas. *Soil and Tillage Research*, 218, 105311.
- Crespo, C., Martínez, R. D., Wyngaard, N., Divito, G., Cuesta, N. M., & Barbieri, P. 2022b. Nitrogen diagnosis for double-cropped maize. *European Journal of Agronomy*, 140, 126600.

- Diovisalvi, N.; Reussi Calvo, N.I, Izquierdo, N. Sainz Rozas, H.R.; García, F.O. 2019. *Visión Rural* 128: 23-25.
- Divito, G.A.; Berg, G.; Edwards Milina, J.P.; Cerrudo, A.A. 2020. *Visión Rural* 134:11-13
- IPNI. 2013. 4R de la nutrición de plantas: un manual para mejorar el manejo de la nutrición de plantas. T. W. Bruulsema; Paul E. Fixen; y Gavin D. Sulewski (ed.). Traducción al español. IPNI. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-24977-5-0.
- Martínez Cuesta, N., Carciochi, W., Salvagiotti, F., Sainz Rozas, H. R., Wyngaard, N., López De Sabando, M., & Barbieri, P. 2021. DTPA-extractable zinc threshold for wheat grain yield response to zinc fertilization in Mollisols. *Soil Science Society of America Journal* 85(3)
- Reussi Calvo, N.I., Echeverría, H. E., Sainz Rozas, H.R. 2008. Usefulness of foliar nitrogen-sulfur ratio in spring red wheat. *Journal of Plant Nutrition*, 31(9), 1612-1623.
- Reussi Calvo, N.I., y H.E. Echeverría. 2006. Estrategias de fertilización nitrogenada en trigo: balance hídrico para el sur bonaerense. *Ciencia del Suelo*. 24 (2): 115-122.
- Sainz Rozas, H. R., Eyherabide, M., Larrea, G. E., Martínez Cuesta, N., Angelini, H. P., Reussi Calvo, N. I., & Wyngaard, N. 2019. Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana. *Actas Simposio Fertilizar 2019*

Nutrientes para sistemas sustentables en la región pampeana central

¿Qué hay de nuevo viejo?

Adrián Rovea, Vanesa Loza y Franco Permingeat

CREA Teodelina
acrovea@gmail.com

Los sistemas de producción agrícola en la Pampa Central se han ido intensificando. La intensificación es el resultado de la potencialidad que tienen estos suelos y de la influencia de napa. La napa + el potencial del suelo son dos factores importantes, pero, si no se maneja la nutrición de los cultivos, el proceso de intensificación puede ser negativo.

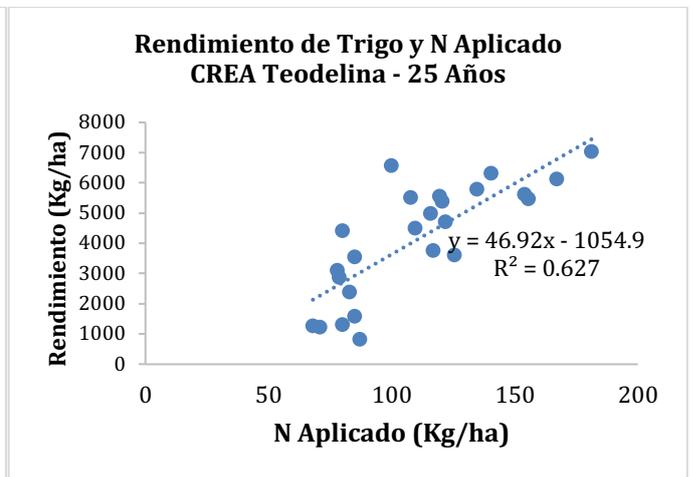
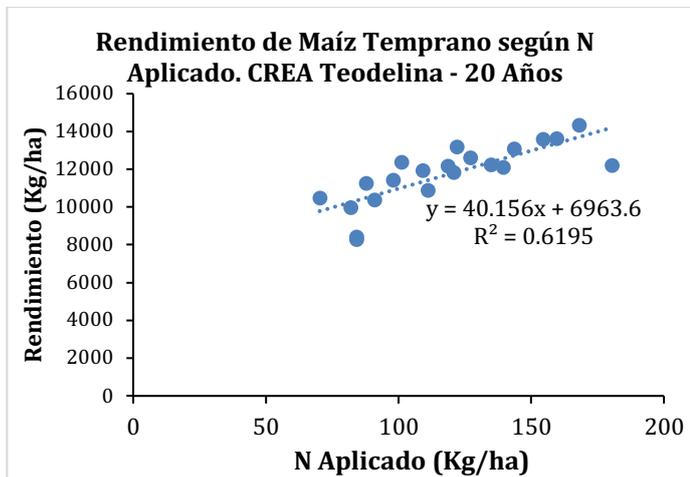
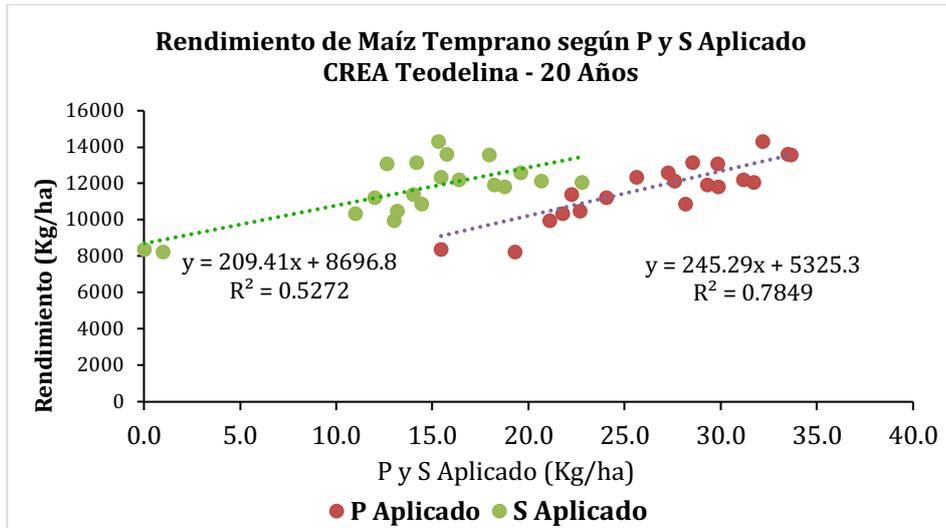
Con los miembros del CREA Teodelina se ha trabajado desde su comienzo en el aumento de rendimiento de los cultivos. Uno de los factores importantes es el correcto manejo de la nutrición de los cultivos. Hay otros factores que son importantes como material genético, fecha de siembra, control de enfermedades, malezas, etc. En este caso vamos a hacer especial mención de la nutrición. Unas de las lecciones más grandes que he recibido como agrónomo cuando comencé a trabajar como asesor es el hincapié que hacían los productores en obtener altas productividades más allá de la inversión. Me decían primero los quintales, luego el costo. Y esto me marcó. Al principio costaba entenderlo, pero con el tiempo me di cuenta que era lo correcto. En general, primero se pone el costo y luego la productividad. Con este pensamiento siempre logramos cultivos restringidos y nunca logramos obtener sus máximos potenciales. Con el tiempo entendimos el sinergismo que hay entre los nutrientes y la residualidad – reciclaje de los mismos en el tiempo. Vemos como la correcta nutrición se va notando año a año en los distintos cultivos. Al obtener mejores rendimientos vamos logrando mayores aportes de materia orgánica al suelo y vemos como la fertilidad física y química de los suelos mejora.

Hablemos un poco de nuestra historia: al principio del CREA, en los años 92-93 se comienza a trabajar en respuesta a nitrógeno (N) y fósforo (P), pero no se obtenían resultados interesantes. Los mismos aparecieron cuando se los comenzó a integrar, los ensayos eran de NP y no por separado. Ahí se aprendió del sinergismo entre nutrientes. Desde entonces se los ve de manera integrada.

El NP primero fue en trigo y maíz. Luego azufre en soja. El azufre en soja nos permitió aumentar significativamente los rendimientos en soja 1° y muy significativamente en soja 2°. Las respuestas promedio fueron de 300 – 500 kg en soja 1° y 800 – 1000 kg en soja 2°. Luego el azufre se comenzó a incorporar en las gramíneas, trigo y maíz.

Hoy la nutrición de nuestros cultivos de gramíneas es N-P-S-Zn y en soja P-S. En soja 1° apareció respuesta a N como nutriente residual y no como aporte en el mismo año. Tenemos respuestas por el N utilizado en años anteriores y en situaciones de mucha rotación con gramíneas. Hay que entender que, en los sistemas de alto aporte de rastrojo, el N es clave en el funcionamiento general de la mineralización y en evitar la inmovilización que nos va a afectar en el cultivo siguiente. Hemos encontrado respuesta a N en soja 1° donde hay altos aportes de rastrojos, como ejemplo en antecesor Trigo/Maíz 2°.

Junto con la respuesta a los diferentes nutrientes se trabajó todos los años validando las curvas de N para cada ambiente. Con el aumento de los rendimientos hay un aumento de la dosis media de N aplicado. Lo mismo sucede con P y S.



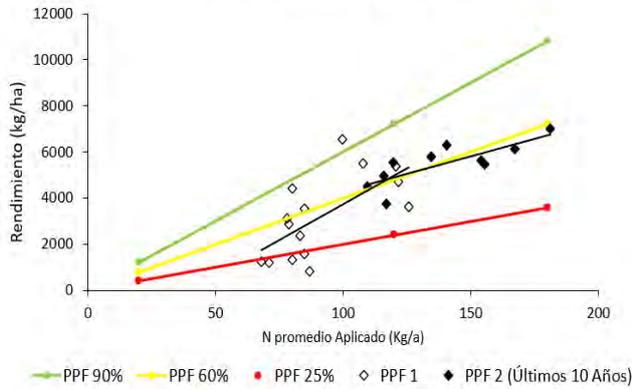
Queremos aclarar que todo el N que se utiliza es de manera incorporada. Lo primero que se realizó es evaluar la eficiencia de uso de N de manera voleada o incorporada. El uso de N es mucho más eficiente si se lo incorpora a que si se lo volea y, en mayor escala, cuando tenemos altas coberturas de gramíneas.

Unos de los interrogantes que nos planteábamos era si, por las altas dosis de N utilizadas, teníamos problemas de lixiviación del mismo. Para tal fin comenzamos a trabajar con Silvina Restovich de INTA Pergamino evaluando N-nitrato en napas. Los resultados que obtuvimos son muy satisfactorios. Los valores encontrados son muy por debajo del valor

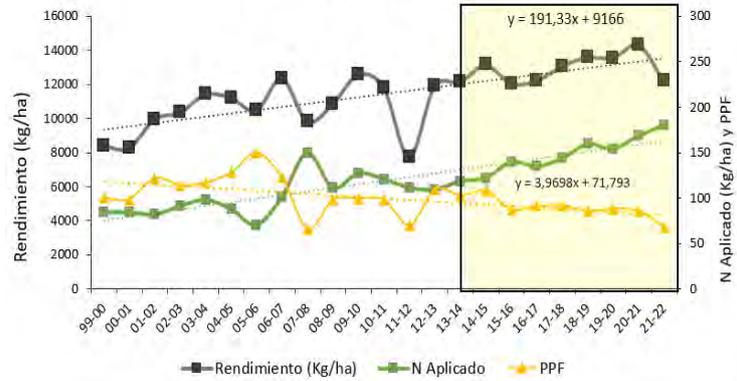
umbral. Esos resultados nos dan tranquilidad, pero es un tema que debemos seguir evaluando.

Para ver que tan eficientes somos con el uso del N, comenzamos a medir la Productividad Parcial del Factor en Nitrógeno (PPF-N). Es una medida que nos indica que tan eficiente somos por cada unidad de nitrógeno que aplicamos y se estima como cociente entre el rendimiento obtenido y la dosis de N aplicada. Los valores de eficiencia a lo largo de los años han ido mejorando y se van estabilizando. Estos datos son muy alentadores y nos dicen que somos eficientes en la utilización del N. Vemos que hemos aumentado el rendimiento, la cantidad de N y mejorado la eficiencia de uso.

Productividad Parcial del Factor (Kg Grano/Kg N Apl.) para Trigo
CREA Teodelina - 25 Años



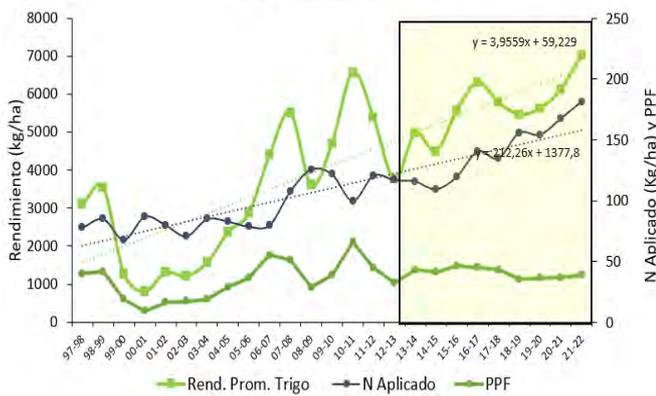
Evolución de Rendimiento en Maíz Temprano, N Aplicado y PPF.
CREA Teodelina - 23 Años



Lo que observamos en ambos casos que estamos siendo eficientes en el uso del N, estos datos son muy alentadores por dos motivos:

- 1- Somos eficiente en el uso de N.
- 2- Estamos siendo eficientes en el resto de los factores que influyen en el rendimiento como: elección de genética, fechas de siembra, control de malezas, control de enfermedades, nutrición balanceada, ambientaciones, rotación de cultivos, etc.

Evolución de Rendimiento de Trigo, de N Aplicado y de PPF
CREA Teodelina - 25 Años



Como último dato de la evolución de algunos indicadores químicos, hemos visto que los valores de P y N (0-60 cm) en el suelo a lo largo de más de 20 años de agricultura continua han mejorado, no han sufrido el deterioro que se ven en otras zonas o lotes. En la Tabla 1 se observa la mejora en P y en kg de N (0-60 cm) en los lotes de producción.

Productividad Parcial del Factor (Kg Grano/Kg N Apl.) para Maíz Temprano y Tardío
CREA Teodelina - 23 Años

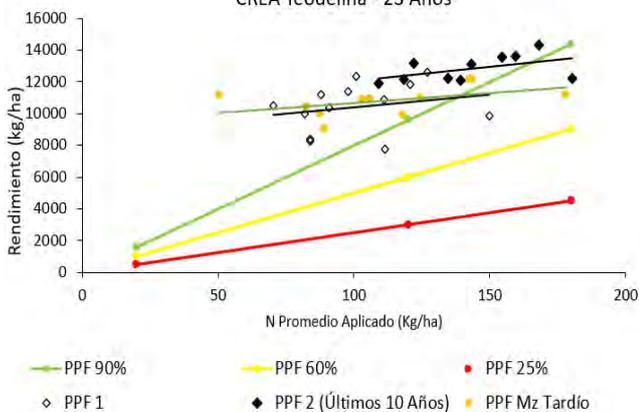


Tabla 1. Evolución Análisis de suelo. CREA Teodelina – 18 años

Campaña	P (ppm)	N Kg/ha (0-60 cm)	S
04-05	11,4	76,15	
22-23	22	117,27	12,43
Dif.	10,6	41,12	

Todos estos indicadores nos van dando la pauta de que estamos en equilibrio con la utilización de tecnología de Procesos e Insumos. Todos estos datos son propios del Crea Teodelina a lo largo de 30 años de funcionamiento Grupal.

Estrategias y manejo para la nutrición de cultivos en zona núcleo Pampeana

Gustavo N. Ferraris

Manejo de cultivos INTA Pergamino
ferraris.gustavo@inta.gob.ar

TRIGO, en la búsqueda de rendimiento y calidad.

El trigo es el principal cultivo de invierno de la Región Pampeana Argentina. Su potencial productivo y la época del año en la que crece, lo hacen una de las especies con mayor exigencia de nutrientes. En los últimos años, se han liberado variedades que significan un enorme avance en el potencial de rendimiento del cultivo, alcanzando en la zona central, niveles de producción que hasta hace poco tiempo eran propios del sudeste de Buenos Aires.

Para lograr altos rendimientos es necesario acumular una buena cantidad de agua en el perfil de suelo. El trigo crece en una estación fría y seca, por lo tanto, necesita de las reservas para crecer en buena condición. Es posible sostener altos rendimientos con escasas precipitaciones, si el suelo está adecuadamente cargado de humedad al momento de la siembra.

El **nitrógeno (N)** es el principal nutriente del trigo. Su disponibilidad es un factor clave para determinar los rendimientos y la calidad, a través de la concentración de gluten y proteína de sus granos. La decisión más importante que debe tomar el productor es la dosis a aplicar. En la región, se determina definiendo un objetivo de N, entre el disponible en suelo al momento de la siembra y el agregado a través de los fertilizantes. Este N objetivo depende a su vez, del rendimiento y proteína que el productor busca alcanzar. Así, rendimientos del orden de 6000 kg/ha, un objetivo ambicioso pero alcanzable para la zona núcleo pampeana, se obtienen proporcionando de 170 a 180 kgN/ha. Además del N disponible, existen índices de mineralización que permiten estimar la cantidad liberada al sistema por mineralización de la materia orgánica. Una baja fertilización determinará menores rendimientos, pero especialmente granos de baja calidad, que afectan la aptitud panadera de las harinas.

A causa del ciclo seco actual, en las tres últimas campañas ha incrementado la superficie en la que N se incorpora, por lo general en forma

previa a la siembra (Figura 1). Esto reúne diversas ventajas: La remoción previa aumenta la temperatura del suelo, mejorando la implantación y facilitando la mineralización de la materia orgánica. Mejora la distribución del fertilizante, respecto al de aplicadores de doble plato. El fertilizante es colocado en la solución del suelo, por debajo de los residuos. La relevancia de esta práctica aumenta en regiones continentales, con escasas o nulas lluvias invernales. En un escenario más húmedo, el costo y logística podrían desalentar su adopción privilegiando otras estrategias como la partición de la aplicación, entre siembra y macollaje

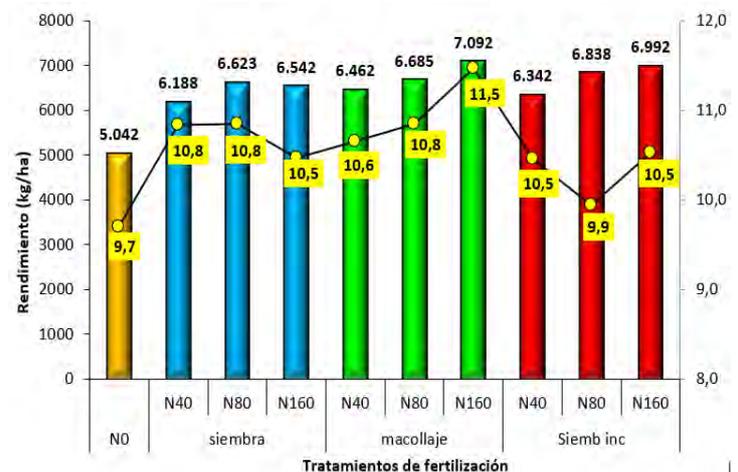


Figura 1. Rendimiento (kg ha^{-1}) y concentración de proteína en grano para diferentes dosis y momentos de aplicación de nitrógeno en un sitio de alto rendimiento en Pergamino. Campaña 2022/23.

Para un adecuado balance entre rendimiento y calidad, no sólo es importante la cantidad sino también la distribución del N en el tiempo. En las aplicaciones a la siembra o en las primeras etapas del cultivo, se prioriza la formación del área foliar y un alto número de macollos, apuntalando rendimiento. Aplicaciones más tardías promueven la acumulación de N en grano, aumentando la calidad. Para un monitoreo en tiempo real del cultivo, se han desarrollado un gran número de herramientas digitales, de fácil

manejo, que permiten la aplicación justa y precisa de N cuando se detecta una deficiencia, a través de cambios en la coloración del canopeo. El uso de estas modernas tecnologías de sensoramiento tiene grandes beneficios económicos y ambientales.

El **fósforo (P)** es el otro nutriente que determina los rendimientos del cultivo. Presenta un ciclo más cerrado que N, con menores vías de ingreso y salidas del sistema. Su reservorio es el suelo, a través de sus coloides, arcilla y materia orgánica. La evolución en el tiempo depende de las cantidades aportadas a través de los fertilizantes y abonos orgánicos i.e. estiércol, y de la extracción con las cosechas. Por este motivo, es aconsejable el aporte de dosis similares a las que se prevé exportar con los granos. A diferencia de otros países, la Región Pampeana Argentina se ha caracterizado por un historial de balance negativo, y disminución de las reservas de los suelos. Numerosos estudios de larga duración han documentado las ventajas de una estrategia de mayor fertilización a la actual. El fósforo agregado al cultivo de trigo, servirá de abastecimiento a la soja posterior, y a los siguientes cultivos de la secuencia.

Azufre (S) es un elemento cuyo ciclo en el suelo y funciones en la planta están emparentadas con las de N. Su reservorio es la materia orgánica del suelo. Ambientes degradados, con baja materia orgánica, erosión, rotación con escasa frecuencia de gramíneas, constituyen ambientes con alta frecuencia de respuesta positiva a la fertilización. Por el contrario, el uso de riego complementario o la presencia de napas conteniendo sales de sulfatos constituyen una vía de ingreso al sistema, que reduce la necesidad de fertilizantes. Fuentes o mezclas que aportan N y S en relación 8:1 son utilizadas habitualmente a campo, asegurando una nutrición balanceada. Al igual que P, el S agregado a trigo impactará positivamente en los rendimientos del cultivo de verano subsiguiente.

Entre los microelementos, el **Zinc (Zn)** cobra especial importancia en los cultivos de gramíneas como trigo, cebada o maíz. La oferta se reduce en condiciones de pH alto, presencia de calcio (Ca) en abundancia, baja materia orgánica, tiempo seco y bajas temperaturas. El agregado de altas dosis de P en línea de siembra disminuye temporalmente su disponibilidad. La necesidad de fertilización se identifica en base a un análisis de Zn en suelo. Cuando su disponibilidad se

encuentra por debajo de 1 mg/kg (0-20 cm), se han documentado respuestas en el rango de 5 a 10 %.

Por último, existen numerosas tecnologías emergentes como el uso de hormonas de crecimiento, microorganismos promotores y otras moléculas de origen orgánico que, por una vía intermedia entre la mejora fisiológica y la nutrición, están siendo paulatinamente adoptadas con beneficios crecientes desde lo productivo, siendo insumos que por su origen y comprobada inocuidad pueden contribuir a generar una renovada visión de nuestra agricultura.

La nutrición representa la principal inversión del productor en los cereales de invierno, y la herramienta más eficaz para incrementar sus rendimientos, calidad y rentabilidad. Aplicar el abundante conocimiento disponible es de singular importancia para lograr una mejora continua, en cultivos que no cesan de crecer.

MAÍZ. El cultivo más tradicional de zona núcleo pampeana

El maíz es un cultivo emblemático de la región central de Argentina. Su versatilidad, amplitud de fechas de siembra, facilidad de manejo, control de malezas y cosecha generan un crecimiento en la superficie, año tras año. En la actualidad conviven diferentes sistemas, alternativos a la siembra tradicional de primavera. La siembra diferida a noviembre-diciembre amplía el período de barbecho facilitando la acumulación de nutrientes en el suelo. La inclusión de leguminosas de cobertura aumenta la dotación de N por fijación biológica. Sin embargo, es creciente la cantidad de has implantadas como cultivo de segunda, tras de una legumbre o gramínea de cosecha. En este caso, los suelos resultan agotados en su disponibilidad, incrementando las necesidades de fertilización.

Las dosis óptimas resultan de la combinación de clima y suelo, fecha de siembra, densidad, potencial de rendimiento del cultivar y sus requerimientos internos. Por este motivo, los experimentos que combinan estas variables están ampliamente difundidos, privilegiando el estudio de las interacciones frente a los efectos simples (Figuras 2 y 3).

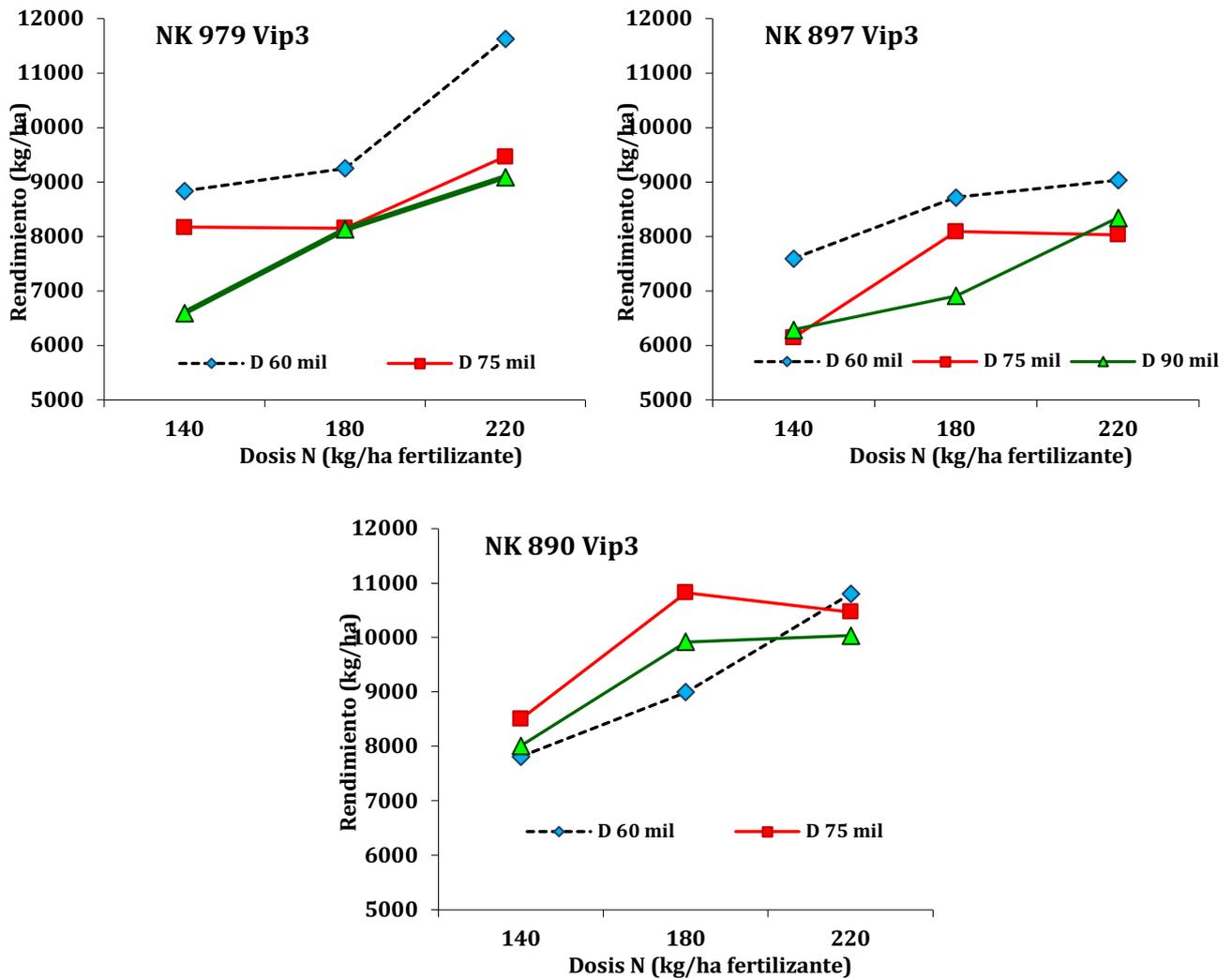
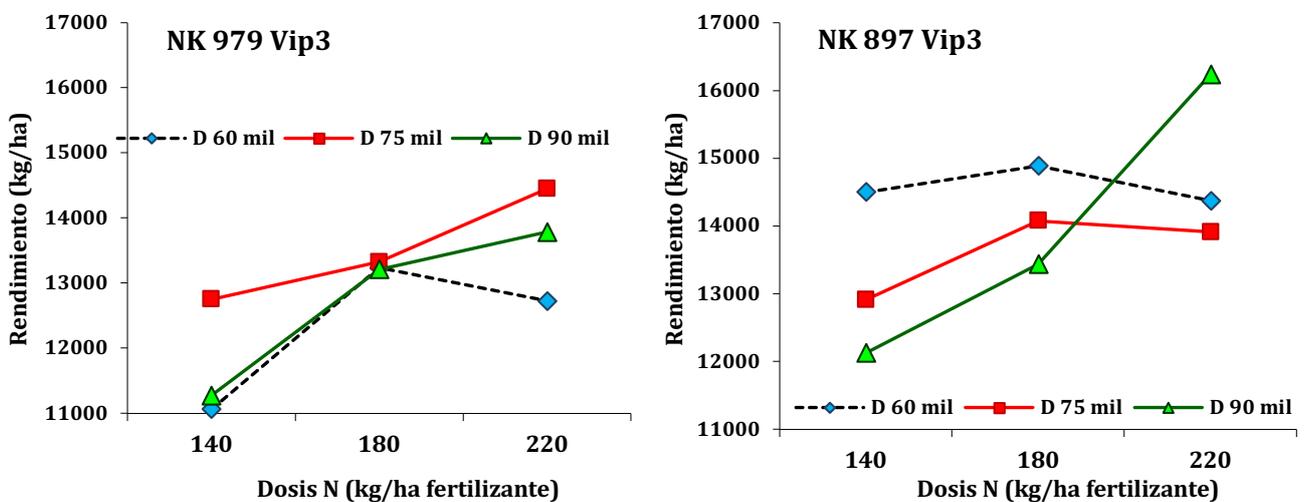


Figura 2. Producción media (kg ha⁻¹) según genotipo, tratamientos de densidad y fertilización nitrogenada en maíz. INTA Pergamino, maíz de siembra temprana, ciclo 2021/22.



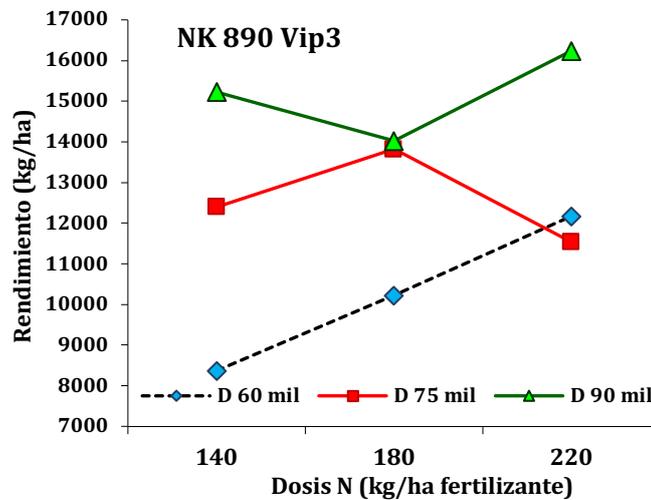


Figura 3. Producción media (kg ha⁻¹) según genotipo, tratamientos de densidad y fertilización nitrogenada en maíz. INTA Pergamino, maíz de siembra tardía, ciclo 2021/22.

Nutrición del cultivo de SOJA. Logros y avances recientes

La soja es el cultivo más importante de la Argentina. A pesar de su alta concentración de nutrientes en los granos, es el menos fertilizado. Su singular adaptación para crecer en suelos de baja fertilidad, ha determinado el origen de un balance de fertilización – extracción netamente negativa.

En la Región Pampeana Argentina, el nutriente que mayor frecuencia de respuesta ha presentado es **fósforo (P)**. La disponibilidad disminuye hacia el este y sur de Argentina. Este se debe a la mayor extracción –las isohietas aumentan desde el oeste hacia el este– y por la mineralogía y textura de los suelos, que determina una mayor fuerza de retención.

La respuesta esperada de la soja a la fertilización con P depende de su nivel en el suelo. En diferentes regiones y situaciones agronómicas se han documentado respuestas económicamente positivas cuando la disponibilidad en el estrato 0-20 cm es inferior a un nivel crítico que suele variar entre 12 y 16 mg kg⁻¹, medido por el método de Bray y Kurtz I. No

obstante, el incremento derivado de la fertilización puede estar afectado por variables de manejo. En INTA Pergamino, se han documentado incrementos de mayor magnitud en cultivos de alto rendimiento, en siembras tempranas, con grupos de maduración cortos – especialmente GIV- y espaciamiento reducido entre hileras.

La fertilización fosforada impacta en los rendimientos de soja, pero podría generar un incremento en el cultivo siguiente, por lo común una especie invernal, a partir del contenido residual que permanece en el suelo. Esto es de particular importancia cuando se implementan rotaciones intensivas o en ambientes de alto rendimiento, donde la extracción se maximiza. En esta línea, en un experimento conducido en Arribeños, General Arenales, se determinó que, a mediano plazo, esquemas de reposición y aun de reconstrucción de los niveles de P lograron mayores rendimientos y rentabilidad respecto de fertilizaciones de mínima con el criterio de ahorrar costos. La respuesta se mantuvo proporcionalmente estable en campañas históricamente secas, bajo diferentes cultivos. (Figura 4).

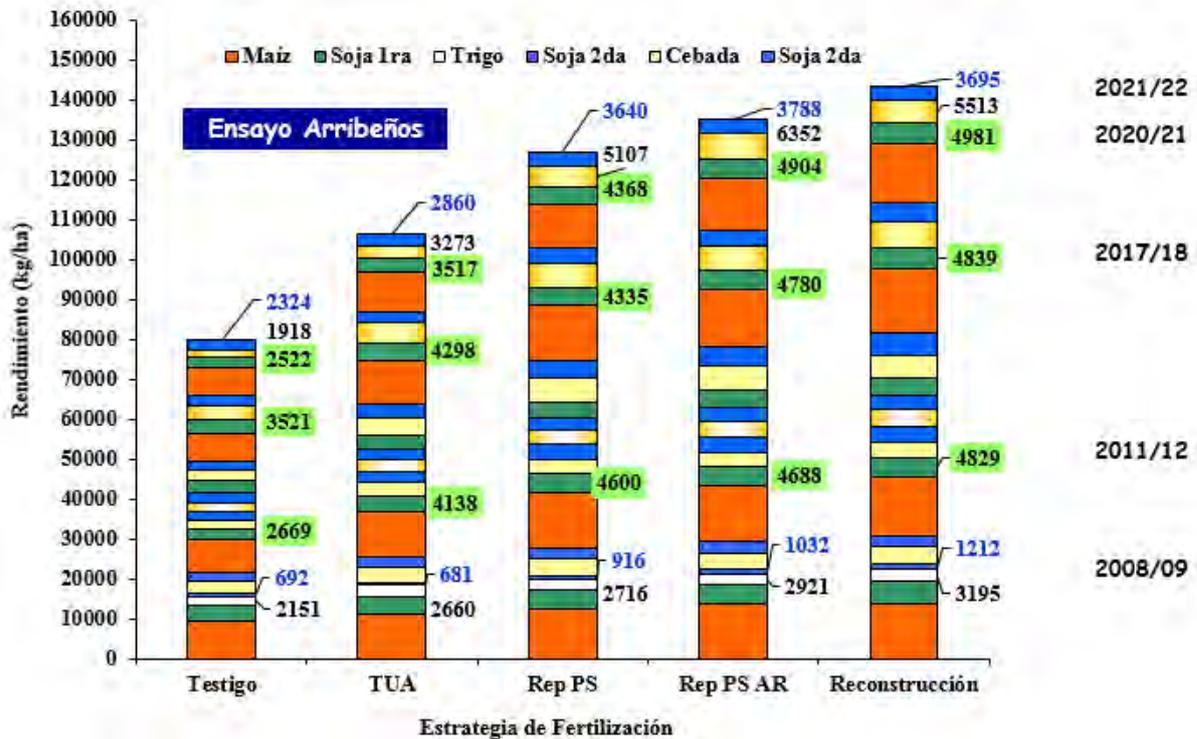


Figura 4. Producción por cultivo (kg ha^{-1}) de diferentes estrategias de fertilización acumulada en una secuencia maíz - soja - trigo/soja - cebada/soja - maíz - soja - cebada/soja - trigo/soja - soja - cebada/soja - maíz. Arribeños, General Arenales. Campañas 2006/07 a 2021/22.

En Argentina, hay una diversidad muy grande de fuentes de P entre las cuales puede optar el productor. Esto incluye variantes en formas físicas -macrogranulados, microgranulados o líquidos- y químicas -ortofosfatos o polifosfatos-. La práctica abarca diferentes manejos como la aplicación anticipada, en la línea de siembra o en bandas al costado o por debajo de las semillas.

Azufre (S) es otro elemento relevante. Asociado a la materia orgánica, se han observado las mayores respuestas en ambientes de larga tradición agrícola, mal rotados, erosionados o con barbechos cortos previo a la siembra. Numerosos grupos de investigación han desarrollado indicadores de diagnóstico y predictores de la respuesta esperable combinando la disponibilidad actual como sulfatos con el potencial de mineralizar S durante el ciclo del cultivo. En soja, el S es agregado comúnmente mediante mezclas físicas o químicas junto a P, prioritariamente bajo la forma de sulfato de calcio, y en menor medida como S elemental.

Además de PS, varios **microelementos** se han tornado deficientes en los suelos argentinos, y su aporte podría generar incrementos adicionales.

Estos pueden ser aplicados vía tratamiento de semilla, directamente al suelo o en forma foliar sobre el canopeo del cultivo. Algunos ejemplos son los de cobalto (Co) y molibdeno (Mo), cofactores de enzimas muy importantes en el proceso de fijación biológica de nitrógeno (N). Boro (B) es esencial por su participación en la diferenciación y retención de estructuras reproductivas. Zinc (Zn), aun cuando es un elemento con frecuencia relacionado a los cereales, en un importante activador enzimático y controlador de patógenos de diverso origen. Regionalmente, esta lista podría incluir otros elementos muy relevantes como Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y molibdeno (Mo).

En los últimos tiempos, se han desarrollado numerosos productos con efecto fisiológico cuyo rol principal no es nutrir al cultivo sino apuntalar el crecimiento durante una etapa clave para el rendimiento. Estos se denominan por su funcionalidad "**bioestimulantes**" o "**fisioactivadores**". Incluye una variedad de formas orgánicas que pueden ser muy disímiles entre sí, constituyendo un agrupamiento más funcional que bioquímico. El verdadero impacto de estos insumos, así como factores tecnológicos relacionados a dosis, momentos de aplicación o

compatibilidad con defensivos es hoy motivo de numerosos estudios.

Finalmente, cabe destacar la particular forma que tiene la soja para proveerse de N, el elemento principal y requerido en mayor cuantía. El alto contenido proteico de granos y planta entera ha generado un mecanismo evolutivo, que es la fijación biológica (FBN). Por medio de este proceso, la soja establece un mecanismo de simbiosis con una bacteria presente en el suelo, pero a la vez introducida a través de inocular las semillas, el *Bradyrhizobium japonicum* (Bj). Cuando este mecanismo falla, el cultivo podría sufrir una severa penalidad en los rendimientos, lo que ha originado una industria proveedora de inoculantes en constante evolución. El éxito de Bj

ha motivado otros desarrollos microbianos más recientes, basados en la introducción de controladores biológicos –biofungicidas– promotores de crecimiento vegetal o solubilizadores de nutrientes presentes en el suelo.

A pesar de su reconocida rusticidad, la variedad de tecnologías enumeradas da cuenta del grado de tecnificación que ha alcanzado esta especie en nuestro país. La correcta nutrición a partir de un diagnóstico preciso asegura la conservación de los suelos, a la vez que permite aprovechar al máximo el potencial de nuevas tecnologías, maximizando los ingresos para el productor y el país.

Nutrientes para sistemas sustentables en el Sur de Córdoba

Espósito, G.; Cerliani C. y Naville R.

Facultad de Agronomía y Veterinaria – Universidad Nacional de Río Cuarto

Los suelos del Sur de Córdoba están presentando un creciente deterioro de su fertilidad física, química y biológica que afecta sustancialmente la productividad de los cultivos. El material originario de los suelos de esta región es franco arenoso muy fino con escaso coloide órgano mineral y tendencia natural a la compactación. En esta condición, la disminución del contenido de materia orgánica, el aumento del tamaño de los equipos de alto peso y la menor rotación de cultivos ha llevado a incrementar el proceso de compactación de los suelos, principalmente en los primeros 20 cm de profundidad. Este contexto conlleva a una disminución de la infiltración y redistribución del agua de lluvia lo cual impacta en una menor disponibilidad de agua y nutrientes para los cultivos.

Por otro lado, la continua extracción de nutrientes en la biomasa (mediante silaje) y en los granos de los cultivos, ha implicado una pérdida significativa de la fertilidad de los suelos. En primer lugar, se destaca la pérdida de bases intercambiables, principalmente Ca y Mg, con la consecuente disminución del pH por debajo de 6 como valor modal y la detección de lotes con deficiencia de Mg y respuesta en el rendimiento ante el agregado de este nutriente. Además, la pérdida de materia orgánica justifica la respuesta de los cultivos a la adición de 15 kg/ha de azufre y la necesidad de incorporar N en los cultivos de cereales en cantidades crecientes.

Los valores de fósforo disponible han disminuido de su contenido original (estimado en más de 70 ppm) a valores inferiores a 10 ppm. Por este motivo se han establecido umbrales críticos de 16, 18 y 20 ppm para soja, maíz y trigo respectivamente y se han estimado valores de fósforo equivalente en alrededor de 2 kg de P para recuperar una ppm de P del suelo. Con esta estrategia se puede definir el criterio de suficiencia. No obstante, las investigaciones realizadas, a nivel zonal, con franjas de reposición han permitido mantener elevadas producciones con una recuperación de fertilidad de fósforo del suelo.

Esta región se ha caracterizado por presentar deficiencia de Zn en maíz desde la campaña 97/98, por este motivo se han realizados numerosas experiencias de fertilización y se ha establecido el umbral de 1 ppm mediante DTPA

como criterio de suficiencia a partir del cual se recomienda aplicar a razón de 1-1,5 kg/ha de Zn, en los fertilizantes arrancadores o como combinaciones de curasemillas y fertilizantes foliares. La adición de fósforo sin el agregado de Zn provoca un aumento en la severidad de la deficiencia de este último nutriente. Cabe aclarar que el fósforo estimula el crecimiento radical y el Zn mejora la tolerancia fisiológica al estrés, razón por la cual es imprescindible ajustar ambos nutrientes para mejorar el crecimiento de los cultivos en condiciones de escasa disponibilidad hídrica, característica de los años secos en esta región.

Entre los restantes micronutrientes, en las últimas campañas se han detectado numerosos análisis de suelo con valores de B disponible por debajo de 1 ppm, por ello hemos realizado ensayos de aplicación foliar de este nutriente en soja (V7-R1) y en maíz (V8-V10) con resultados que evidencian el incremento de rendimiento cuando los valores del suelo están por debajo de ese umbral.

En las últimas campañas se han detectado algunos lotes con deficiencia de potasio, es necesario resaltar que en esta región la mayoría de los suelos presentan valores elevados de K intercambiable. Cabe mencionar que en estas condiciones se detectaron severos procesos de compactación de suelo, razón por la cual la deficiencia de K en estos ambientes se explica por la dificultad de las raíces en interceptar capas de suelo con K suficiente.

Finalmente se destaca que, recientemente hemos encontrado en algunos sistemas de producción efectos del empleo de bioestimulantes, fertilizantes biológicos, uso de ácidos fúlvicos y aminoácidos vegetales sobre la absorción de nutrientes, el crecimiento vegetal (aéreo y radical) y finalmente sobre el rendimiento de los cultivos. Esta situación exige un mayor esfuerzo en la experimentación de la fertilidad biológica de los suelos para establecer criterios de remediación.

Se sintetiza que para mejorar la sustentabilidad del manejo nutricional de los cultivos en el Sur de Córdoba es necesario considerar el triángulo de la fertilidad del suelo en sus características físicas, químicas y biológicas del suelo.

Relevamiento de variables edáficas relacionadas con la salud del suelo en el noreste y noroeste argentino

Sainz Rozas, H.^{1,2,3}, M. Eyherabide^{1, 3}, N.I. Reussi Calvo^{1,2}, N. Wyngaard^{1,2}, V. Aparicio^{2,3}, F. García¹, M.F. González San Juan⁴, N. Rouillet⁴, N. Stahringer⁵, A. Sanzano⁶, D.S. Torrielli⁷, A. Saperdi⁷, A.J. Saperdi⁷, J.M. Orcellet⁸, H.P. Angelini³

¹Facultad de Ciencias Agrarias, UNMDP. ²CONICET. ³EEA INTA Balcarce. ⁴Fertilizar AC, ⁵Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), ⁶EEA Obispo Colombes, ⁷Asesor privado, ⁸Nidera Semillas
*Contacto: sainzrozas.hernan@inta.gob.ar

Introducción

La salud del suelo se define como la capacidad del mismo para cumplir determinadas funciones en el agroecosistema. Por lo tanto, un suelo saludable debe ser capaz de sostener la productividad, contribuyendo a la calidad ambiental y mejorando la salud humana, animal y vegetal.

La materia orgánica del suelo (MO) se utiliza generalmente como un indicador de salud del suelo (ISS; Cambardella y Elliott, 1992; Vagar, 2004), ya que está relacionada con varias funciones del suelo dentro del agroecosistema como la provisión de nutrientes (nitrógeno, fósforo y azufre, entre otros), la capacidad de intercambio catiónico, la estabilidad de agregados y la actividad microbiana (Weil y Magdoff, 2004; Picone, 2014), y por ende, la capacidad del suelo para degradar y/o retener plaguicidas y sus metabolitos (Hernández Guijarro et al., 2018a y b; Aparicio et al., 2018 y 2023; San Juan et al., 2023).

El pH del suelo puede ser considerado como otro ISS ya que la acidez o alcalinidad regula la disponibilidad de nutrientes, la actividad microbiana y la adsorción de pesticidas a la matriz mineral del suelo (Picone, 2014; De Gerónimo y Aparicio, 2022). Además, en condiciones de extrema acidez o alcalinidad puede haber un efecto directo negativo del pH sobre el crecimiento de los cultivos (Brady and Weil, 1998). La disponibilidad de fósforo también podría ser considerado como un ISS ya que el crecimiento de los cultivos y el aporte de residuos estaría limitado en suelos con baja disponibilidad del mismo.

A partir de mediados de los '90 en algunas provincias del NOA (Tucumán y Salta) y del NEA (región este de Santiago del Estero, suroeste del Chaco y norte de Entre Ríos) se adoptaron modelos productivos extensivos propios de la región pampeana. En ambas regiones, la superficie destinada a la agricultura ha aumentado de 1.619.800 ha a 6.450.690 ha en

2019 (MAGyP, 2023), debido principalmente el crecimiento del área sembrada con soja y en menor medida maíz y girasol (Satorre y Andrade, 2021). Esta expansión fue en detrimento de los bosques y selvas nativos y de cultivos regionales típicos de dichas zonas.

Los suelos sobre los cuales se ha desarrollado la agricultura en el NOA y NEA pertenecen al orden de los Molisoles, Alfisoles, Inceptisoles, Entisoles y Vertisoles (Figura 1) y, en general, sus principales limitaciones, según orden, van desde la erosión hídrica o eólica, escasa estabilidad estructural, riesgo de ascenso de sales y climáticas por déficit de agua (Panigatti, 2010).

En estas condiciones mantener niveles adecuados de MO según suelo y ambiente y elevados niveles de cobertura son esenciales para mantener la salud edáfica, dada las elevadas temperaturas de estas zonas que aceleran la descomposición de la MO y el ascenso de sales a través de la evaporación. En un muestreo realizado en 2018 en la región pampeana, se determinaron caídas de MO del 26% al 34% en los suelos bajo agricultura, respecto de suelos prístinos. Sin embargo, hay poca información disponible de los cambios de esta variable como consecuencia del avance de la agricultura para los suelos del NOA y NEA argentino.

En un relevamiento realizado en 2005, Sainz Rozas et al. (2012) informaron que los valores más bajos de P extractable (Bray & Kurtz, 1945; P-Bray) se determinaron al norte de Entre Ríos, mientras que en el oeste de Santiago del Estero y norte y este de Tucumán, norte de Córdoba y Santa Fe, los niveles de P-Bray variaron de 20 a 90 mg kg⁻¹ según zonas y tipos de suelo. En los suelos del suroeste del Chaco los niveles de P-Bray del horizonte superficial varían de 30 a 166 mg kg⁻¹ según los tipos de suelo (Carta de suelos del INTA, 1985). Los niveles de P han disminuido de manera considerable en la región pampeana en los últimos años y la mayor parte de dicha región presenta niveles que varían de 10 a 20 mg kg⁻¹ (Sainz Rozas et al., 2019). Sin embargo, no se conoce como la actividad agrícola ha afectado los

niveles de P-Bray en algunas regiones del NOA y NEA argentino.

Para el caso del pH (relación suelo: agua 1: 2,5) se han informado valores que varían de 5,5 a 7,5 para el suroeste del chaco (Carta de Suelos del INTA, 1985) y de 6 a 7,5 para el norte de Entre Ríos, Santa Fe, y Córdoba, este de Tucumán y oeste de Salta (Sainz et al., 2011). En los últimos años el pH de los suelos ha disminuido a valores por debajo de 6 en el este y norte de la región pampeana (Sainz Rozas et al., 2019). Sin embargo, no se conoce como la actividad agrícola ha afectado el pH de los suelos en algunas regiones del NOA y NEA argentino.

El objetivo de este trabajo fue determinar los niveles actuales de MO, pH y P-Bray en suelos bajo agricultura y compararlos con los niveles de suelos prístinos en algunas zonas del NOA y NEA argentino.

Materiales y métodos

Entre julio y octubre del 2022 se tomaron un total de 295 muestras de suelos prístinos y con más de 10 años de agricultura en algunas zonas del NOA y NEA argentino (Figura 1). Las áreas de muestreo se determinaron a partir de una grilla de 25x25 km, sobre la que se seleccionaron aquellas celdas donde al menos la mitad de la cobertura corresponde a lotes con cultivos agrícolas. Para definir la cobertura en cada celda se utilizó a información generada por el INTA en el proyecto Mapa Nacional de Cultivos, específicamente el mapa correspondiente a la campaña de verano de 2021 (De Abelleyra, et al., 2021). Las áreas prístinas correspondieron a montes, pastizales naturales y en menor proporción a zonas cercanas a los alambrados no disturbadas. En cada sitio (prístino y bajo agricultura), se tomó una muestra de suelo compuesta (30 sub-muestras por sitio) de la capa de suelo de 0 a 20 cm usando un muestreador de acero inoxidable

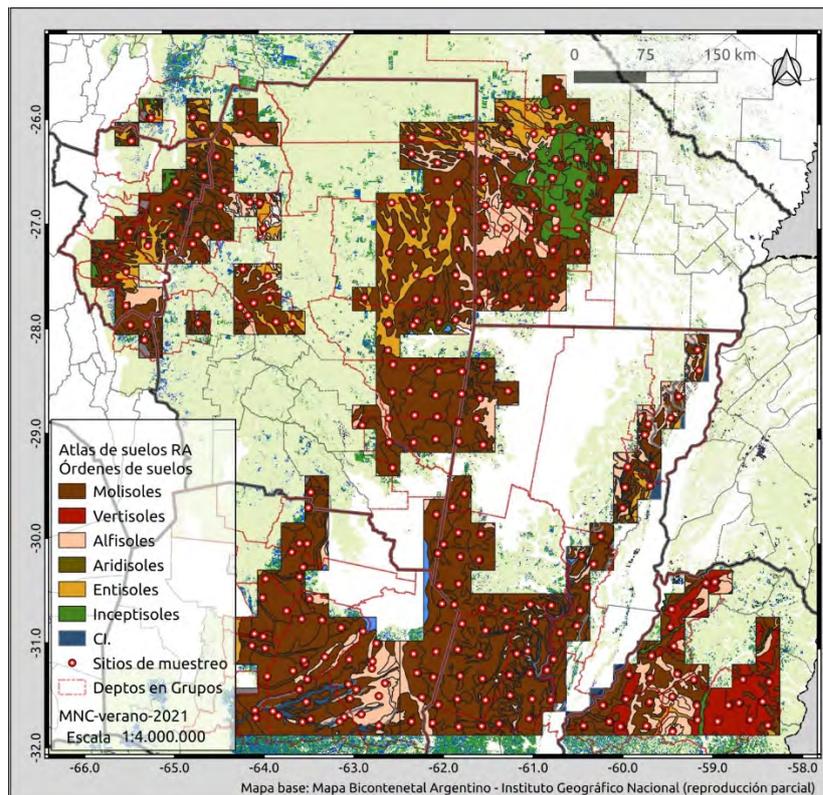


Figura 1. Mapa indicando los sitios de muestreos y los principales órdenes de suelos. CI: Complejos indefinidos.

Los análisis de suelo se realizaron en el laboratorio del Grupo de Relaciones Suelo-Planta del INTA-FCA Balcarce a partir de muestras secadas a 30°C y tamizadas por 2 mm. Se determinó pH actual (relación suelo: agua de 1:2,5), P-Bray I (Bray and Kurtz, 1945) y el contenido de MO por calcinación, siguiendo el método propuesto por Schulte & Hopkins (1996).

Se pesaron 5 g de muestra en crisoles de 15 mL, posteriormente fueron colocados en estufa durante 24 h a 105°C. Las muestras fueron enfriadas en desecador y pesadas. Luego se colocaron durante 2 h en una mufla a 360°C, posteriormente se transfirieron a un desecador y luego de enfriarse se registró el peso nuevamente. El cálculo de MO se realizó por

diferencia de peso en las distintas temperaturas, según:

$$\% \text{ MO} = ((\text{peso } 105^{\circ}\text{C} - \text{peso } 360^{\circ}\text{C}) * 100) / \text{peso } 105^{\circ}\text{C}$$

Para el análisis estadístico de los datos las zonas se dividieron en 5 grupos: sur de Salta, este de Tucumán y oeste de Santiago del Estero (G1), este de Santiago del Estero y suroeste del Chaco (G2), norte de Córdoba (G3), norte de Santa Fe (G4) y norte de Entre Ríos (G5). En cada grupo y condición de suelo fue realizado un análisis estadístico descriptivo determinándose los cuantiles (0,05; 0,25; 0,50; 0,75 y 0,95), media, desvío estándar y rango intercuartílico. Para el contraste de hipótesis de la diferencia de medias de MO, pH y P-Bray para grupo y condición del suelo, se evaluó el supuesto de normalidad de la distribución de la variable por medio del test Shapiro-Wilk y Kolmogorov Smirnov en función del número de datos de cada grupo y condición de manejo. La comparación de medias para MO, pH y P-Bray se realizaron con el método paramétrico de la distribución T-student luego de corroborar la normalidad y la igualdad de varianza con el F-test, usando la corrección de Welch cuando las varianzas no fueron iguales. Cuando los datos no tuvieron una distribución normal se utilizó el test no paramétrico de Wilcoxon (Bilisoly et al., 1997). El análisis estadístico y comparación de medias se realizó en R versión 4.2.3 (R Core Team, 2023).

Resultados y discusión

La distribución de los datos de MO y pH fue normal para cada grupo y condición de suelo y sesgada para P-Bray, con una gran proporción de datos con bajas concentraciones y una menor proporción con valores muy altos, comportamiento comúnmente observado con este nutriente (Pagani, 2014).

El valor más alto de MO en suelos prístinos se observó en el G5 (norte de Entre Ríos; **Tabla 1**), debido a la textura más fina de los suelos de este grupo, que deriva en una mayor estabilización y protección de la MO (Guggenberger et al., 1995; Six et al., 2002), y al régimen de humedad del suelo respecto a las demás zonas (Panigatti, 2010). La reducción de la MO varió del 11,7% (G2) hasta el 28,0% (G3). Aunque en general el valor promedio y la mediana fueron similares, en algunos grupos (G2 y G5), el 50% del set de datos mostró valores inferiores a los promedios en los suelos bajo agricultura (**Tabla 1**), lo que pone de manifiesto que estas reducciones de la MO respecto a los suelos prístinos son aún mayores a las determinadas a partir de los valores promedios. Los valores más elevados de reducción de MO son similares a los informados para la región pampeana por Sainz Rozas et al. (2019), a pesar de la menor historia agrícola de los suelos del NOA y NEA. Esto pone de manifiesto que la mineralización de la MO en estas zonas se acelera cuando se quita la cobertura de monte nativo o pastizal natural por las temperaturas más elevadas y la menor protección de la fracción orgánica en estos suelos (Panigatti, 2010; Guggenberger et al., 1995; Six et al., 2002), respecto a los suelos de la región pampeana. Esta caída de los niveles de MO puede impactar en la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y azufre en el corto a mediano plazo. En este contexto, incrementar la cobertura del suelo por residuos y la entrada de carbono al suelo a través de una mayor intensificación (más cultivos por año y mayor proporción de gramíneas, uso de cultivos puente) o establecer sistemas mixtos agrícolas-ganaderos, serían herramientas de manejo claves para mantener y/o mejorar los niveles de MO actuales.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos para los contenidos de MO (0–20 cm) para algunos suelos prístinos (Prist.) y agrícolas (Agric.) del noroeste y noreste argentino.

Grupo	n	CS	Cuantiles					Media	DS	Diferencia
			0,05	0,25	0,50	0,75	0,95			
----- MO (%) -----										

1	45	Príst.	1,87	2,72	3,39	3,87	5,35	3,44 a	1,06	
	45	Agric.	2,03	2,35	2,73	3,01	3,44	2,72 b	0,50	-20,9
2	107	Príst.	2,19	2,8	3,26	3,68	4,64	3,26 a	0,7	
	107	Agric.	1,95	2,52	2,82	3,27	3,87	2,88 b	0,58	-11,7
3	46	Príst.	2,55	3,2	3,91	4,79	5,75	4,00 a	0,99	
	46	Agric.	1,83	2,58	2,87	3,25	3,80	2,88 b	0,58	-28,0
4	67	Príst.	2,59	3,1	3,63	4,21	5,11	3,69 a	0,81	
	67	Agric.	1,86	2,57	2,82	3,16	3,45	2,82 b	0,47	-23,6
5	30	Príst.	4,31	5,15	5,73	6,26	7,08	5,66 a	0,94	
	30	Agric.	3,51	3,87	3,99	4,47	4,68	4,11 b	0,4	-27,4

CS: condición de suelo; DS: desvío estándar; Diferencia: reducción de la MO en los suelos bajo agricultura en comparación con los suelos prístinos. Dentro de cada grupo valores con letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$ o $0,01$) según el *test t*.

El pH del suelo mostró un comportamiento diferente según grupos. En los grupos 3 y 4 se determinó tendencia hacia una mayor acidificación (aunque no fue estadísticamente significativa) en los suelos bajo agricultura respecto a los suelos prístinos, mientras que en los restantes grupos este comportamiento fue inverso (Tabla 2). En los grupos 1 y 2, zonas con mayor temperatura y evapotranspiración anual, el aumento de pH de los suelos bajo agricultura fue del 3,4% al 5,6% (Tabla 2). Un estudio de suelos realizado en 2005–2006 en la región pampeana y extrapampeana ($n = 30000$) informó que el 75% de los suelos del este de Tucumán y oeste de Salta mostraron valores de pH por debajo de 6,8 a 7,1 (Sainz Rozas et al., 2011), los que son inferiores a los determinados actualmente en dicha zona (G1; Tabla 2). Por otro lado, un estudio de clasificación de suelos realizado para el este y suroeste del Chaco (Carta de suelos del INTA, 1985) informó que la mayoría de los suelos tenían valores de pH por debajo de 6,8, valor inferior al informado para dicha zona (G2; Tabla 2). Esto sugiere un proceso de alcalinización, lo cual es opuesto a lo informado para la región pampeana. El aumento del pH podría traer aparejado una

disminución de la disponibilidad de micronutrientes como hierro, manganeso, cobre y cinc (Brady and Weil, 2008). En este sentido, Jobbágy et al. (2008) informaron que el ingreso de la agricultura reemplazando el monte nativo o al pastizal natural aumenta el drenaje profundo, seguido por ascensos graduales del nivel freático y una fuerte movilización de sales disueltas, lo que podría incrementar el pH si son sales sódicas. Esto podría disminuir la fertilidad de los suelos cuando los niveles freáticos y las sales movilizadas alcanzan la superficie. Según dichos autores esta vulnerabilidad hidrológica exige la compresión y el manejo de los ciclos del agua y las sales en sistemas bajo agricultura desde una perspectiva eco-hidrológica y plantea el desafío de desarrollar una “agronomía del agua” capaz de contribuir a la regulación de los niveles freáticos en los ecosistemas cultivados. Esto podría lograrse utilizando cultivos puentes con raíces profundas de manera de mantener el nivel freático por debajo de la zona de enraizamiento de los cultivos, además de proveer cobertura, lo que disminuiría la evaporación y, por ende, el ascenso freático.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos para el pH (0-20 cm) para algunos suelos prístinos (Prist.) y agrícolas (Agric.) del noroeste y noreste argentino.

Grupo	n	CS	Cuantiles					Media	DS	Diferencia
			0,05	0,25	0,50	0,75	0,95			
										%
1	45	Prist.	5,92	6,70	7,20	7,80	8,38	7,25 b	0,80	
	45	Agric.	6,50	7,10	7,50	7,90	8,56	7,50 a	0,64	3,4
2	107	Prist.	6,20	6,60	7,00	7,30	7,80	7,00 b	0,52	
	107	Agric.	6,70	6,86	7,40	7,70	8,00	7,39 a	0,41	5,6
3	46	Prist.	5,25	6,32	6,75	7,20	7,87	6,73 a	0,72	
	46	Agric.	5,90	6,32	6,70	7,00	7,52	6,70 a	0,53	-0,4
4	67	Prist.	5,43	5,85	6,10	6,35	6,87	6,12 a	0,51	
	67	Agric.	5,60	5,8	6,00	6,25	6,97	6,09 a	0,41	-0,5
5	30	Prist.	5,79	6,42	6,75	7,00	7,25	6,67 b	0,46	
	30	Agric.	6,10	6,52	7,10	7,30	7,80	6,69 a	0,58	0,3

CS: condición de suelo; DS: desvío estándar; Diferencia: reducción del pH en los suelos bajo agricultura en comparación con los suelos prístinos. Dentro de cada grupo valores con letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$ o $0,01$), según el *test t*.

Para los suelos en condición prístina, los valores de P-Bray variaron de 19 a 124 mg kg⁻¹, correspondiendo el valor más bajo al G5 (norte de Entre Ríos; **Tabla 3**), resultado esperable en función de los bajos niveles de P del material original a partir del cual se desarrollaron estos suelos (Morras, 1996). En suelos bajo agricultura, los niveles de P-Bray variaron de 13 a 87 mg kg⁻¹, correspondiendo el valor más bajo al G5 (norte de Entre Ríos, **Tabla 3**). Se determinaron disminuciones significativas del P-Bray en todos los grupos, del 17% al 62% (**Tabla 3**). En el G4 y G5 (norte de Santa Fe y Entre Ríos, respectivamente), el 50% de los valores de P-Bray fue inferior a 20 y 10 mg kg⁻¹, respectivamente, lo que indica que en estas dos

zonas el P podría ser limitante para la producción de los cultivos según los niveles críticos informados por García et al. (2014). Si bien en los demás grupos los niveles actuales de P-Bray duplican o triplican a los niveles críticos de la mayoría de los cultivos, la fuerte caída del P-Bray observada en los suelos de estas zonas con mucha menor historia agrícola que aquellos de la región pampeana, sugiere que se debe comenzar a monitorear el estado de esta variable a nivel de lote y comenzar a reponer este nutriente cuando la situación lo amerite. Esta práctica es muy poco frecuente en los sistemas productivos del NOA y NEA, ya que la adopción de la fertilización fosfatada es realizada aproximadamente por 40% de los productores (Fertilizar AC, 2022).

Tabla 3. Estadísticos descriptivos para la concentración de P-Bray (0-20 cm) para algunos suelos prístinos (Prist.) y agrícolas (Agric.) del noroeste y noreste argentino.

Grupo	n	CS	Cuantiles					Media	DS	Diferencia	
			0,05	0,25	0,50	0,75	0,95				
										%	
			-----mg kg ⁻¹ -----								
1	45	Prist.	16	39	72	107	169	82 a	54		
	45	Agric.	7	21	46	82	171	62 b	55	-24	
2	107	Prist.	44	82	99	128	163	104 a	41		
	107	Agric.	34	55	78	117	149	87 b	40	-17	
3	46	Prist.	58	86	119	164	222	124 a	53		
	46	Agric.	12	43	69	87	158	72 b	45	-42	
4	67	Prist.	9	29	78	100	140	73 a	46		
	67	Agric.	5	13	20	32	74	28 b	22	-62	
5	30	Prist.	4	5	7	18	74	19 a	26		
	30	Agric.	6	8	10	13	23	13 b	13	-33	

CS: condición de suelo; DS: desvío estándar; Diferencia: reducción de la concentración de P-Bray en los suelos bajo agricultura en comparación con los suelos prístinos. Dentro de cada grupo valores con letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$ o $0,01$), según el *test no paramétrico de Wilcoxon*.

Conclusiones

El avance de la agricultura hacia el NOA y NEA argentino ha provocado reducciones importantes en la MO (principal indicador de salud edáfica) de los suelos respecto a la condición prístina (hasta 28%). En dos de los cinco grupos evaluadas el pH en los suelos bajo agricultura fue superior a aquellos en condición prístina, lo que podría ser consecuencia del ascenso freático, en casos donde los suelos permanecen con poca o nula cobertura viva o muerta la mayor parte del tiempo. Para fósforo, los niveles de P-Bray en suelos bajo agricultura también han disminuido considerablemente respecto a aquellos en condición prístina (hasta 62%) y, en dos de los cinco grupos, estos niveles son limitantes para la producción agrícola.

Los resultados del presente relevamiento plantean la necesidad comenzar y/o intensificar el monitoreo de los niveles de materia orgánica, pH y P-Bray en la región del NEA y NOA argentino. Además, para revertir las tendencias observadas, se deben intensificar las secuencias de cultivos, evaluar la inclusión de cultivos puentes según el clima de cada zona o, inclusive generar planteos mixtos agrícola-ganaderos cuando sea posible.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Fertilizar Asociación Civil por el financiamiento de la investigación.

Bibliografía

- Aparicio, V.; E. De Gerónimo; F. Frolla; G. Domínguez; C. Galarza; P. Barbagelata; A. Irizar, A.; Costa, J.L.; Cerda, A. (2023). Depth distribution of soil, glyphosate, and aminomethylphosphonic acid (AMPA) properties and analysis of crop yield in six long-term experiments, *Journal of Soils and Sediments*, 1-17.
- Aparicio, V. C.; S. Aimar; E. De Gerónimo; M.J. Méndez; J.L. Costa. (2018). Glyphosate and AMPA concentrations in wind-blown material under field conditions. *Land Degradation & Development*, 29(5), 1317-1326.
- Bilisy, R.L., S. Nokes; S.R. Workman. (1997). Statistical treatment of soil chemical concentration data (Vol. 26, No. 3, pp. 877-883). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.
- Brady, N.; R. Weil. 1998. *Soil Acidity. The Nature and Properties of soil*. 14th ed. Prentice-Hall, inc. Simona and Schuster A Viacon Company. Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- Bray, R.H. & L.T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59:39-45.
- De Abelleyra D; S. Verón; S. Banchemo; M. Iturralde Elortegui; S. Valiente; O. Puig; F. Murray; J.P.; Martini; K. Zelaya; D. Maidana; N. Varlamoff; J. Peiretti; P. Benedetti; J. Portillo; M. Melilli; E. Maidana; Y. Goytía; V. Sapino; A. Regonat; F. Cracogna; C. Espíndola; M. Parodi; F. Colombo; J. Scarel; J. Ayala; L. Martins; M. Basanta; A. Rausch; G. Almada; L. Boero; J. Calcha; A. Chiavassa; M. Lopez de Sabando; D. Kurtz; F. Marini; S. Sarrailhe; M. Petek; T. Propato; A. Ferraina; A. Pezzola; C. Winschel; S. Muñoz; J. Mesa; J. Volante. 2021. Mapa Nacional de Cultivos campaña 2020/2021, Colección 1, Versión 1.0, Informe, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Argentina.
<http://www.geointa.inta.gob.ar/2021/09/07/mapa-nacional-de-cultivos-campana-2020-2021/>. Ultima revisión: abril 2023.
- De Gerónimo, E.; V.C Aparicio. (2022). Changes in soil pH and addition of inorganic phosphate affect glyphosate adsorption in agricultural soil. *European Journal of Soil Science*, 73(1), e13188.
- Fixen, P.E. 1998. Technology in perspective—a customer focus. Fertilizer Industry Federation of Australia, Inc., conference technology and training—transforming tomorrow. Oct. 18-21, pp. 41-47.
- García F.O.; L. Picone; I.A. Ciampitti. 2014. Fósforo. En Echeverría H. E. y F.O. García (ed.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Ediciones INTA. 2a. Edición. Buenos Aires, Argentina. ISBN 9-789875-215658. p. 229-264.
- Guggenberger, G.; W. Zech; L. Haumaier; B.T Christensen. (1995). Land-use effects on the composition of organic matter in particle-size separates of soils: II. CPMAS and solution ¹³C NMR analysis. *European Journal of Soil Science*, 46(1), 147-158.
- Hernández Guijarro K.; F. Covacevich; V.C Aparicio, E. De Gerónimo. 2018. Bacterias nativas del suelo con potencial para la degradación de glifosato y promoción del crecimiento vegetal. *Ciencia del Suelo*, versión On-line ISSN 1850-2067.
- Hernández Guijarro, K.; V. Aparicio; E. De Gerónimo; M. Castellote; E.L. Figuerola; J.L. Costa; L. Erijman. (2018). Soil microbial communities and glyphosate decay in soils

- with different herbicide application history. *Science of the Total Environment*, 634, 974-982.
- Jobbágy, E.; M. Nosetto; C. Santoni; G. Baldi. 2008. El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana. Diciembre de 2008 *Ecohidrología de llanuras y cambio de vegetación. Ecología Austral* 18: 305-322.
- MAGyP, 2023. Estimaciones Agrícolas del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, Presidencia de la Nación <https://datosestimaciones.magyp.gov.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>. Consultado en abril de 2023.
- Morrás H. 1996. Diferenciación de sedimentos superficiales en la región pampeana en base a los contenidos de fósforo y potasio, Acta VI Reunión Argentina de Sedimentología, p, 34 – 42, Bahía Blanca, Buenos Aires, 16-27 de mayo.
- Panigatti, J.L. (2010). Argentina: 200 años, 200 suelos (No. P32 INTA 18474 y CD 67). Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, Buenos Aires (Argentina).
- Picone L. 2014. El ambiente físico-químico del suelo relacionado con la fertilidad. En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds.) *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. 2da Edición. Cap. 1, p. 31-51. Ediciones INTA. 2015. ISBN: 978-987-521-565-8. Buenos Aires, Argentina.
- R Core Team (2023), R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, URL <https://www.R-project.org/>,
- R Core Team (2023). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Sainz Rosas, H.; H.E. Echeverría; H.P. Angelini. 2011. Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana Argentina. *Ciencia del Suelo*, 29 (1):29-37.
- Sainz Rozas, H.; Eyherabide, M.; G. Larrea; N. Martínez Cuesta; H. Angelini; N. Reussi Calvo; H. E. Echeverría; N. Wyngaard. 2019. Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana. Argentina. Buenos Aires. 2019. Libro. Otro. Simposio. Simposio de Fertilidad 2019. Fertilizar Asociación Civil.
- San Juan, M.F.; S.M. Lavarías; V.C. Aparicio; K. Larsen; J.C Lerner; A. Cortelezzi. (2023). Ecological risk assessment of pesticides in sediments of Pampean streams, Argentina. *Chemosphere*, 313, 137598.
- Satorre E. y F. H. Andrade. 2021. Cambios productivos y tecnológicos de la agricultura extensiva argentina en los últimos quince años. *Ciencia del Suelo*. Volumen 29 número 173:19-27.
- Schulte, E.E.; B.G. Hopkins. 1996. Estimation of organic matter by weight loss-on-ignition, In: FR Magdoff et al, (ed) *Soli organic matter: Analysis and interpretation*, SSSA Spec, Publ, 46, SSSA, Madison, WI, P 21-31.
- Six, J.; C. Feller; K. Denef; S.M. Ogle; J.C. S´a Moraes; A. Albrecht. 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – effects of no-tillage. *Agronomie*. 22, 755-775. <https://doi.org/10.1051/agro:2002043>.
- Weil, R.R., Magdoff, F. 2004. Significance of soil organic matter to soil quality and health. In Magdoff, F.; Weil, R.R. (eds.). *Soil organic matter in sustainable agriculture*. Boca Ratón, Florida, Estados Unidos: CRC Press. pp. 1-43.

Módulos de Valoración de Estrategias de Fertilización en Pasturas Pastoreadas

Informe Actividades 2022

Grupo Pasturas Unidad Integrada Balcarce:
Ing. Agr. MSc. María Alejandra Marino¹, Dr. Germán Darío Berone^{1,2}, Dr. Pablo Leandro Cicore².

1. Fac. Ciencias Agrarias UNMDP; 2. INTA EEA Balcarce

Introducción

En los sistemas de producción ganaderos argentinos la fertilización de recursos forrajeros es una práctica poco habitual. Aquellas empresas que la llevan a cabo, en general aplican nutrientes sólo al momento de la siembra de verdeos y pasturas, con dosis que no se ajustan a diagnósticos u objetivos de producción. Existe información que demuestra las ventajas del ajuste de la nutrición de los recursos forrajeros sobre la producción ganadera. En la región, parcelas demostrativas de pasturas bajo corte han mostrado los beneficios del ajuste de la nutrición en la producción de pasto. Sin embargo, no se incorpora como práctica de manejo.

El seguimiento de módulos de estrategias de fertilización en campos de productores podría contribuir a la demostración y difusión de esta tecnología.

Por esto, durante 2022 se establecieron tres módulos demostrativos de estrategias de fertilización de pasturas, y se siguió la producción de pasto en lotes pastoreados.

Objetivos

- Establecer, según protocolos simples, condiciones comunes de evaluación de cambios en la producción de forrajes en diversos escenarios productivos representativos de planteos agropecuarios de la Región Pampeana.
- Cuantificar las respuestas de producción a partir de estudios integrados en red bajo

condiciones comunes de manejo y en el marco de sistemas representativos de planteos agropecuarios.

Metodología

Sitios

Se establecieron tres módulos demostrativos (MD) en la Prov. Buenos Aires (Imagen 1):

MD-Sudoeste: Establecimiento La Chacra Laprida.

MD-Sudeste: Establecimiento Ojo de Agua. Paraje El Dorado, Ruta 226 km 35.

MD-Cuenca del Salado: Establecimiento San Miguel. Ruta 2 km 255,5.

La información edáfica de los sitios donde se instalaron los MD se presenta en el Cuadro 1.

Se trabajó en ambientes contrastantes, dos de aptitud ganadera (MD-Sudoeste y MD-Cuenca del Salado) y uno en suelo de aptitud agrícola (MD-Sudeste).

Los tres MD se establecieron en pasturas consociadas convenientemente establecidas con cobertura densa y homogénea. El tipo de pastura correspondió a las recomendadas en los ambientes productivos seleccionados. Así, en los MD-Sudoeste y MD-Cuenca del Salado se usaron “pasturas de bajo” cuya especie principal fue agropiro, mientras que en el MD-Sudeste se usó una “pastura de loma” integrada por alfalfa y pasto ovillo.

Cuadro 1. Características edáficas de los sitios en los que se establecieron los módulos demostrativos (Prov. Buenos Aires).

Zona	Sitio	Tipo de suelo	pH	P-Bray (ppm)	MO (%)	N-NO ₃ (ppm)
Sudoeste	Est. La Chacra – Laprida	Argialbol	7,5	8	nd	nd
Sudeste	Est. Ojo de Agua - Mar del Plata	Argiudol	5,9	12,1	7,8	nd
Cuenca del Salado	Est. San Miguel - Gral. Guido	Natracuol	7,5	10,7	nd	15

Imagen 1. Ubicación de los módulos demostrativos de estrategias de fertilización en pasturas pastoreadas 2022, instalados en la Prov. de Buenos Aires.



Condiciones climáticas

La sequía que afectó la región Pampeana durante el período otoño – invierno – primavera 2022 también se observó en los tres MD. Excepto lluvias puntuales que se registraron en el mes de marzo y en el mes de julio, en general durante el resto de los meses las precipitaciones fueron inferiores a los valores históricos para cada sitio (Figura 1).

Por otra parte, en términos generales las temperaturas medias diarias fueron cercanas a los promedios históricos para cada sitio. Sin embargo, cabe destacar que en Laprida las temperaturas invernales fueron superiores a las medias históricas para esa época (Figura 1).

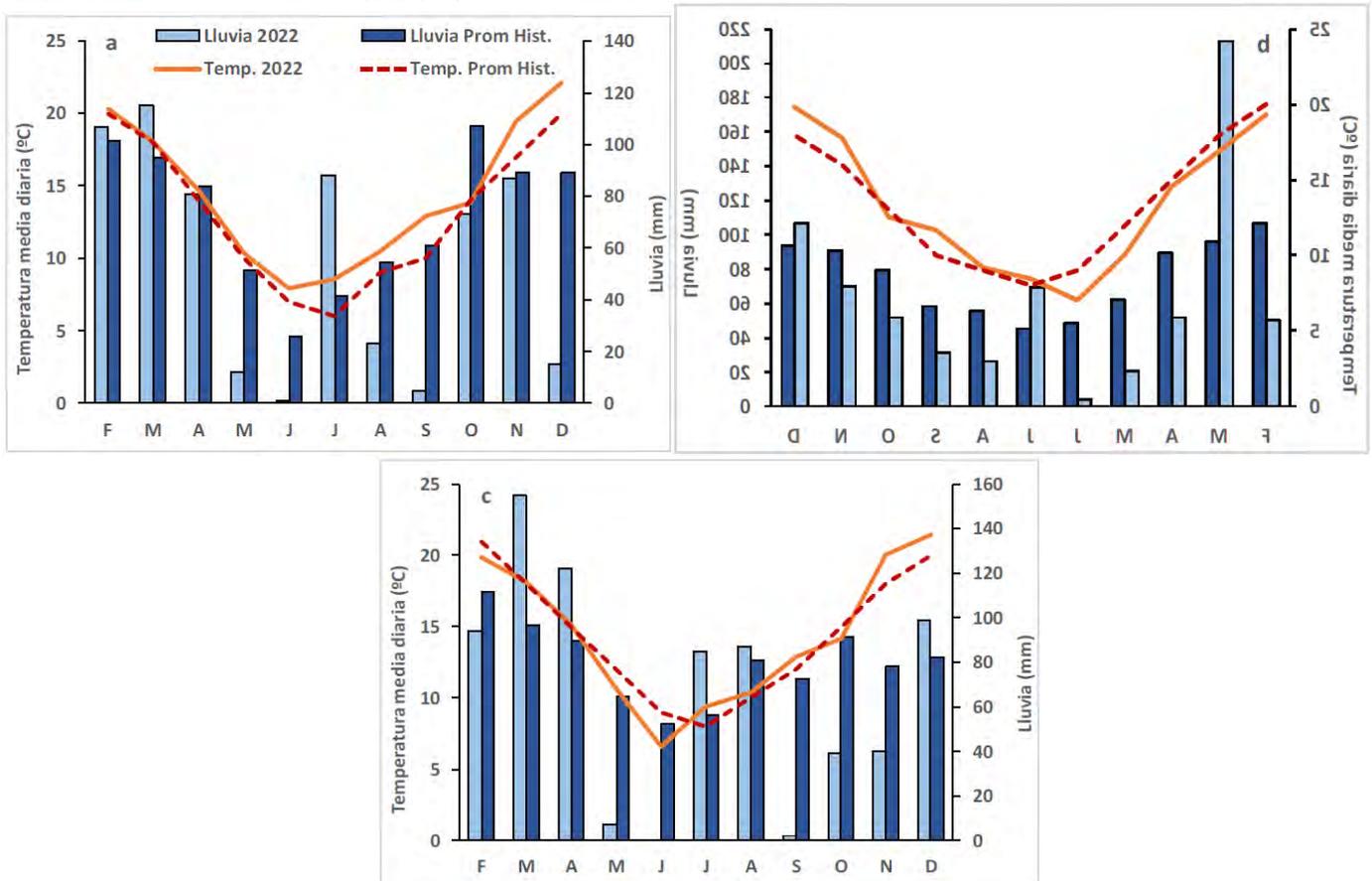


Figura 1. Datos climáticos mensuales (temperatura media diaria del aire 2022; temperatura media diaria del aire promedio histórico; lluvias 2022 y lluvias promedio histórico) para: a. Laprida, b. Mar del Plata y c. Dolores. Fuentes: Sociedad Rural de Laprida; Wheatherspark.com; Establecimiento Ojo de Agua y Establecimiento San Miguel.

Tratamientos de fertilización

Las estrategias de fertilización se definieron en base a un tratamiento “Testigo” sin agregado de nutrientes (TT), un tratamiento semejante a la aplicación que usa habitualmente el productor (Tratamiento Actual, TA), un tratamiento ajustado a la recomendación basada en rendimiento esperado y disponibilidad de nutrientes (análisis de suelo) con N y P (Tratamiento Recomendación Frecuente, TRF) y un tratamiento intensificado con agregado de nutrientes superior (N, P y S) (Tratamiento Alto Rendimiento, TAR). Cada tratamiento se aplicó en una franja, y el ancho de la franja varió en

función del ancho de labor de la fertilizadora utilizada (maquinaria del productor, entre 21 y 25 m). Asimismo, la longitud de las franjas fue de 50 o 100 m según el sitio y las condiciones ofrecidas por cada establecimiento. Cada franja se dividió en tres bloques.

Considerando los requerimientos nutricionales de las pasturas, se establecieron dos momentos de fertilización: otoño (abril) y fin de invierno (agosto). Las fechas de aplicación de los tratamientos se muestran en el Cuadro 2 y fue establecida en función del manejo de cada establecimiento.

Cuadro 2: Composición botánica y fechas de aplicación de los tratamientos de fertilización en cada módulo.

Fertilización 2022	SO-La Chacra (Laprida)	SE-Ojo de Agua (Mar del Plata)	CS-San Miguel (Gral. Guido)
Otoño	--	21 de abril	6 de mayo
Fin de invierno	18 de agosto	8 de julio	13 de agosto

Las dosis de nutrientes aplicadas fueron para P = 0, 10 o 20 kg P/ha (como fosfato diamónico o fosfato monoamónico), para N = 0, 50, 100 kg N/ha (como urea) y para S = 0 y 20 kg S/ha (como Azufertil). Los tratamientos resultantes se

muestran en el Cuadro 3. Cabe señalar que se presentaron inconvenientes con la disponibilidad de los productos fertilizantes y/o con la maquinaria utilizada y cada módulo adaptó el protocolo a las posibilidades de cada empresa.

Cuadro 3: Tratamientos de fertilización propuestos en cada módulo demostrativo.

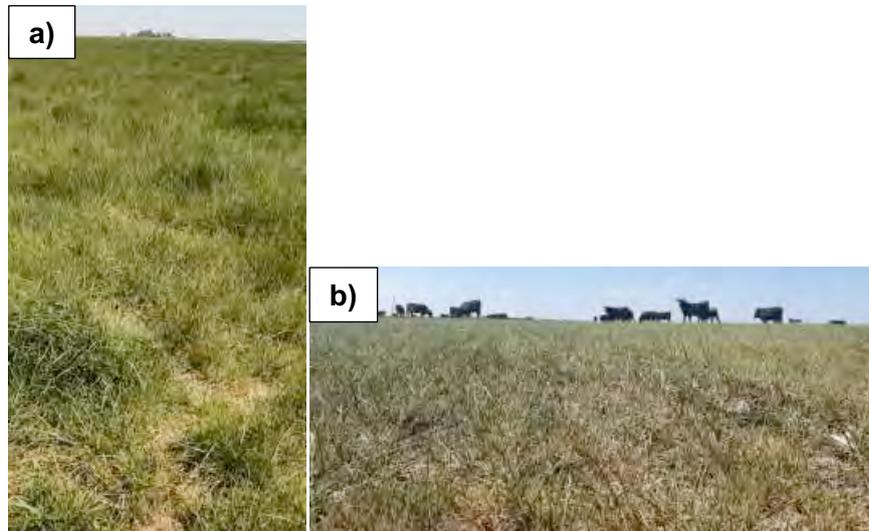
Sitio	Tratamientos	Otoño			Fin de invierno		
		N	P	S	N	P	S
		kg /ha					
SO-“La Chacra”, Laprida	TT	0	0	0	0	0	0
	TA	0	0	0	50	0	0
	TRF	0	0	0	150	20	10
	TAR	0	0	0	200	25	20
SE-“Ojo de Agua”, Mar del Plata	TT	0	0	0	0	0	0
	TA	0	0	0	50	0	0
	TRF	50	20	0	150	0	20
	TAR	100	20	0	200	0	20
CS-“San Miguel”, Gral. Guido	TT	0	0	0	0	0	0
	TA	0	0	0	50	0	0
	TRF	50	10	0	50	0	0
	TAR	50	10	20	50	0	0

Método de pastoreo:

Todos los tratamientos fueron pastoreados simultáneamente con alta carga animal y corta duración (uno a dos días de pastoreo). La frecuencia de pastoreo se estableció en función de la vida media foliar (una suma térmica de 400

– 500 °Cd, temperatura base para pasturas = 4°C), y/o una disponibilidad objetivo de 2000 - 2500 kg MS/ha (Foto 1 a). Los animales se retiraron de los MD dejando un remanente adecuado (5 - 7 cm de altura con presencia de hoja verde, Foto 1 b).

Foto 1: Imágenes de: a) una cubierta de agropiro prepastoreo, y b) el remanente de la pastura post-pastoreo.



Determinaciones:

- **Productividad forrajera:** en cada pastoreo - previo al ingreso de los animales -, se realizó una estimación del forraje disponible. Se utilizaron pasturómetros convenientemente calibrados, y se tomaron determinaciones de altura de pasto comprimida en cada tratamiento y bloque. Para la calibración del dispositivo, en un punto por bloque primero se midió con pasturómetro y en el mismo lugar se cosechó la muestra del forraje disponible en una superficie de 20 x 50 cm por encima de 5 cm de altura. Las muestras cosechadas se secaron para determinar kg MS/ha.

- **Análisis de plantas:** se realizarán análisis (N, P, S) para determinar calidad (proteína) y extracción de nutrientes.

Análisis de datos

Los promedios de los tratamientos evaluados fueron analizados mediante análisis de varianza y comparación de medias (Infostat).

Resultados

1. Módulo demostrativo Sudoeste bonaerense (Laprida)

Responsables: Ings. Agrs. Eric Scherger (GENTOS) y Manuel Arnaude (propietario Establecimiento La Chacra).

En este sitio los tratamientos se aplicaron a fin de invierno y se evaluó el período de producción forrajera primaveral. Acorde con la situación hídrica general, en Laprida las lluvias de febrero a diciembre 2022 (607 mm) fueron menores al promedio histórico para la localidad (800 mm) (Figura 1 a). Pese a esto, los tratamientos con agregado de nutrientes (TA y TRF) presentaron mayor producción de forraje que el tratamiento sin fertilización (TT) ($p < 0,05$). En primavera se efectuaron dos pastoreos, y tal como se muestra en la Figura 2, el efecto positivo del agregado de fertilizantes se observó principalmente en el primer período de rebrote (18/8 al 14/10). En el segundo período de rebrote (14/10 al 17/11), si bien las diferencias disminuyeron TRF volvió a mostrar la mayor disponibilidad de forraje (1335 kg MS/ha), sin diferir de TA, pero diferenciándose de TAR y TT (1160 y 1050 kg MS/ha respectivamente).

La escasa respuesta obtenida con el tratamiento TAR (Figura 2) puede haber estado asociado a un inconveniente en la distribución del fertilizante.

En la Foto 2 se observa el contraste entre los tratamientos SF y FAP aplicados en el MD Sudoeste.

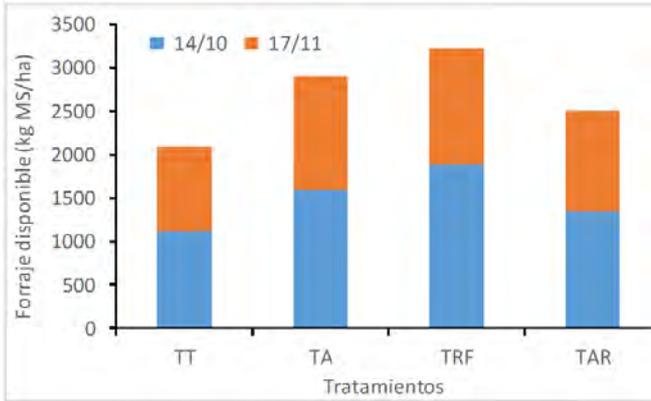


Figura 2: Forraje disponible en las dos fechas de pastoreo (14/10 y 17/11) para los tratamientos aplicados sobre una pastura de agropiro en el MD Sudoeste bonaerense – Laprida.

Como puede observarse en la Figura 2, la producción primaveral de forraje en la pastura de agropiro del MD Sudoeste, para los tratamientos TA y TRF fue 39 y 54 % superior al tratamiento TT (2906, 3220 y 2089 kg MS/ha, respectivamente).



Foto 2: Imagen de los tratamientos SF y FAP en el MD Sudoeste bonaerense: a) mediados de septiembre y b) segunda quincena de diciembre.

2. Módulo demostrativo Sudeste bonaerense (Mar del Plata)

Responsable: Ing. Agr. José Guglielmelli (encargado Ojo de Agua)

En el MD Sudeste, las lluvias febrero – diciembre 2022 fueron 695 mm mientras el promedio histórico es de 915 mm (Figura 1 b). Cabe aclarar que, de las lluvias registradas

durante 2022, 213 mm correspondieron al mes de marzo, y a su vez 130 mm precipitaron en 48 hs. Las elevadas pendientes del paisaje interserrano que caracteriza los lotes del establecimiento habrían ocasionado escurrimiento y una escasa infiltración de esa abundante caída de agua.

En este módulo se llevaron a cabo siete pastoreos y previo a cada uno se midió el forraje disponible (Cuadro 4). En general, los

tratamientos fertilizados presentaron mayores disponibilidades de forraje que el Tratamiento Testigo, sin aplicación de fertilizantes ($p < 0,05$).

El efecto positivo del agregado de nutrientes fue variable según la dosis aplicada y el momento de la fertilización (Cuadro 4, Foto 3). Las mayores diferencias con respecto al tratamiento SF se registraron en los rebrotes de otoño (mediados de mayo) y de inicio de primavera (mediados de septiembre), cuando las condiciones climáticas

favorecieron el crecimiento de las plantas (Foto 3).

El 12 de septiembre la producción de forraje de los tratamientos TRF y TAR duplicaron y TA fue 50 % superior al tratamiento TT (Cuadro 4). En cambio, con bajas temperaturas en invierno y/o deficiencias hídricas avanzada la primavera y en verano la respuesta a los tratamientos de fertilización aplicados fue limitada (Cuadro 4).

Cuadro 4: Disponibilidad de forraje (medición previa a cada pastoreo) para los tratamientos evaluados en el MD Sudeste bonaerense (Mar del Plata).

	13-may.	14-jul.	13-ago.	12-sep.	9-nov.	13-ene.
TT	1730 a	950 a	1625	1645 a	2092 a	2005 a
TA	--	--	1952	2399 b	3110 c	2767 b
TRF	2979 b	1390 a	1830	3554 c	2713 b	2861 b
TAR	2353 c	720 b	2140	3347 c	2453 ab	2607 b
P valor	<0,0001	0,0011	0,1362	<0,0001	<0,0001	0,0003
MDS	489	333	451	453	392	386

Para cada fecha de muestreo letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

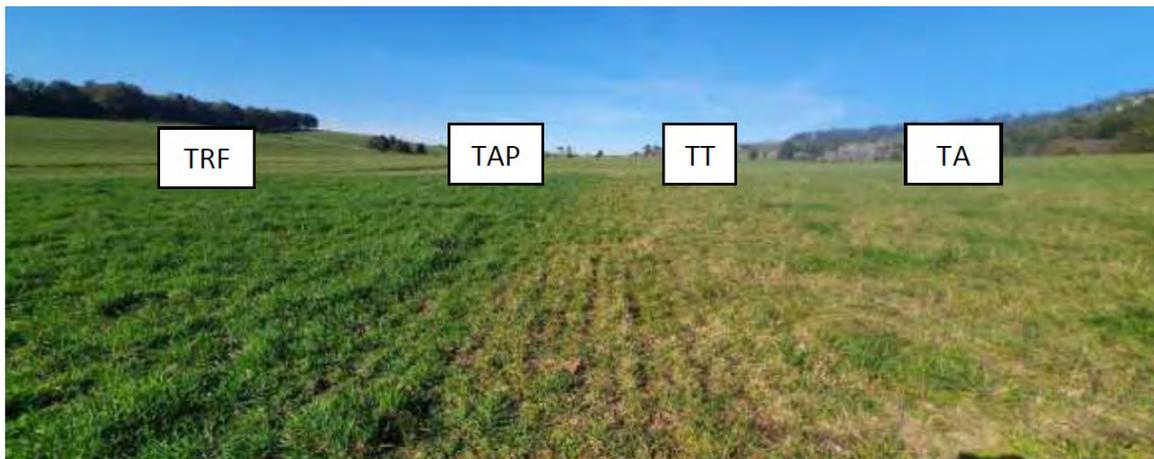


Foto 3: Imagen de los tratamientos Fertilización Intensificada y Sin Fertilización en el MD Sudeste bonaerense (13 de agosto 2022).

Asimismo, en la Figura 3 se presenta la producción estacional de forraje acumulada, distinguiendo el período otoño-invernal del primavero-estival. Puede observarse el marcado incremento en el rendimiento de pasto de los

tratamientos fertilizados y sobre todo del TRF con respecto al TT (15327 y 10047 kg MS/ha, respectivamente), aún en un año con presencia de déficit hídrico en la época de mayor crecimiento de la pastura (primavera y verano).

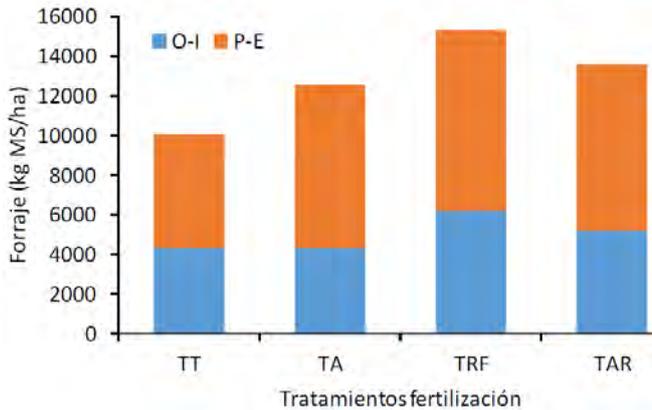


Figura 3: Producción otoño-invernal y primavero-estival de forraje para los tratamientos evaluados en el MD Sudeste bonaerense.

3. Módulo demostrativo Cuenca del Salado (General Guído)

Responsables: Ings. Agrs. Mailén Blaser y Alejandro Chicatún

El MD Cuenca del Salado fue establecido en un ambiente caracterizado por suelos con drenaje deficiente, anegables en la época invernal. Esta condición se verificó después de las lluvias de marzo y abril 2022 (277 mm), y se muestra en la Foto 3 a. Posteriormente, al igual que en los otros dos MD las lluvias registradas en el período mayo – noviembre 2022 (260 mm) fueron inferiores al promedio histórico (396 mm) (Figura 3 b).



Foto 3: Potrero con pasturas de agropiro en establecimiento San Miguel en el mes de agosto 2022.

El MD Cuenca del Salado tuvo la particularidad de ser utilizado en pastoreo en el período otoño-invernal (con un pastoreo en agosto), y posteriormente el potrero fue clausurado desde fines de agosto hasta fines de noviembre para realizar rollos con el crecimiento primaveral de la pastura.

Rendimiento relativo de forraje según estado nutricional de las pasturas

En base a los datos obtenidos para los tres MD de estrategias de fertilización de pasturas durante 2022, fue demostrado que la producción

de pasto sin agregado de nutrientes (TT) estuvo severamente restringida por deficiencias nutricionales. El cálculo de rendimientos relativos considerando el valor obtenido para cada tratamiento en relación al máximo

Al igual que en los otros dos módulos demostrativos, los tratamientos de fertilización aplicados incrementaron significativamente la producción de forraje con respecto al tratamiento sin agregado de nutrientes tanto para el crecimiento otoño-invernal como para el de primavera. Tal como se esperaba, el aumento en la producción de pasto por el agregado de nutrientes fue variable según el tratamiento considerado y el momento de muestreo, con las mayores respuestas observadas en la acumulación primaveral de forraje (Figura 4). En el MD Cuenca del Salado TAR (10923 kg MS/ha) duplicó la producción primaveral de forraje del TT (5738 kg MS/ha), mientras TRF y TA produjeron 86 % y 54% por encima del tratamiento sin agregado de nutrientes (7637 y 8901 kg MS/ha, respectivamente).

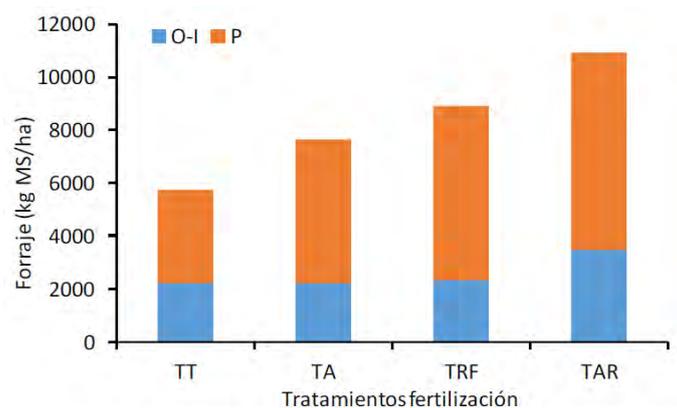


Figura 4: Producción otoño-invernal y primaveral de forraje para los tratamientos evaluados en el MD Cuenca del Salado (Gral. Guído).

de pasto sin agregado de nutrientes (TT) estuvo severamente restringida por deficiencias nutricionales. El cálculo de rendimientos relativos considerando el valor obtenido para cada tratamiento en relación al máximo

rendimiento en cada sitio, facilita el análisis de la información disponible. Esto se muestra en la Figura 5.

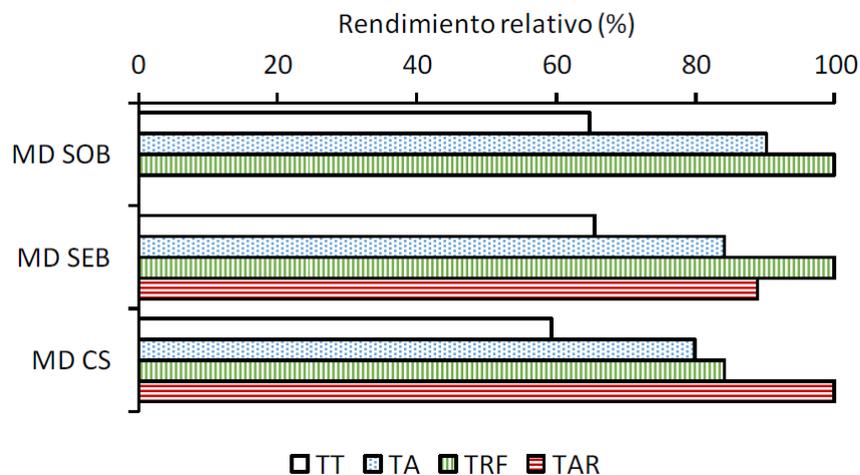


Figura 5: Rendimientos relativos (%) de los tratamientos de fertilización, calculados para la acumulación de forraje registrada en cada módulo demostrativo: Módulo demostrativo Sudoeste Bonaerense (MD SOB), Sudeste bonaerense (MD SEB) y Cuenca del Salado (MD CS).

En pasturas convenientemente manejadas como las utilizadas en este trabajo, el TT presentó de manera consistente valores cercanos al 60% de los alcanzados por los tratamientos de mayor producción. Los tratamientos con agregado de fertilizantes (TA, TRF y TAR) mostraron respuestas variables según el sitio considerado, asociado con cuestiones edafo-climáticas, condiciones de aplicación de los tratamientos, etc. Esto pone de manifiesto la restricción en la producción de pasto impuesta por la deficiencia de nutrientes, aún en un año con una condición hídrica no favorable.

Consideraciones finales

En los tres MD evaluados se registraron deficiencias hídricas estacionales que habrían

limitado el crecimiento de las pasturas y el efecto de los tratamientos de fertilización. Sin embargo, en todos los casos se registraron incrementos significativos en la disponibilidad de pasto por efecto de la aplicación de nutrientes. Resta finalizar los análisis de laboratorio para caracterizar el estado nutricional de las pasturas en cada tratamiento.

Agradecimientos

Se debe destacar la colaboración de las empresas (propietarios, asesores y personal de campo) en donde se instalaron los Módulos Demostrativos, ya que sin ella no se hubiese podido llevar adelante la experiencia.

Mapeo digital de propiedades de suelo en la provincia de Córdoba

Córdoba M.^{1,2,4}, Álvarez C.³, Faule L.³, Godino M.⁴, Pérez M.⁴, Pozzi E.⁵, Morales H.⁵, Monzani F.⁵.

¹Cátedra de Estadística y Biometría, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba.

²Unidad de Fitopatología y Modelización Agrícola (UFyMA), INTA – CONICET.

³Estación Experimental Agropecuaria Manfredi, INTA.

⁴Ministerio de Agricultura y Ganadería de la Provincia de Córdoba.

⁵Infraestructura de Datos Espaciales de la Provincia de Córdoba (IDECOR).

Introducción

En la provincia de Córdoba, Argentina, se ha llevado a cabo en los últimos años un esfuerzo conjunto entre el Ministerio de Agricultura y Ganadería de la Provincia de Córdoba, INTA Regional Córdoba, IDECOR y otras entidades públicas y privadas del sector agropecuario, con el objetivo de generar información georreferenciada y abierta sobre las propiedades del suelo y el sector agro en general. Esto se ha logrado mediante la recopilación de datos disponibles y aportes voluntarios de diversas fuentes. En el año 2020, se publicó una primera versión del mapa de materia orgánica (MO) del suelo, resultado del trabajo colaborativo y el uso de modelos de aprendizaje automático ajustados a partir de una base de datos conformada por muestras de suelo georreferenciadas de MO, fósforo (P), pH, arcilla, arena y limo, junto con covariables procesadas por la IDE provincial, incluyendo el Mapa de Cobertura de Suelo (Land Cover) de Córdoba. El trabajo fue realizado siguiendo los protocolos definidos en el MDS, el cual permite predecir y monitorear variables edáficas de carácter dinámico, como la MO y nutrientes como el P y pH, que son fundamentales para el diagnóstico de la salud del suelo y la comprensión de su condición actual y evolución.

Para el año 2021, se propuso actualizar el mapa existente con la recolección de una mayor cantidad de muestras y generar nuevos mapas de P, pH y las fracciones granulométricas arena, arcilla y limo. Se actualizaron también las covariables calculadas por la IDE, incorporando datos importantes como el mapa geológico de la provincia de Córdoba del año 2021, elaborado por SEGEMAR y la Secretaría de Minería de la provincia de Córdoba.

En el año 2022, se planificó continuar con la recolección de datos brindados por instituciones públicas y privadas, con el objetivo de mantener

y consolidar la red de trabajo colaborativa. Se acordó generar una nueva versión de los mapas de MO, P y pH, incorporando los nuevos datos y actualizando las covariables calculadas por la IDE. Se destaca un incremento significativo en la cantidad de datos utilizados para el modelado, con más de 6.300 datos para cada variable, lo que representa un aumento del 26% en MO y más del 50% para P y pH, en comparación con el año 2021. Se utilizaron protocolos analíticos basados en métodos probados y modelos de aprendizaje computacional enmarcados en el MDS. En el presente trabajo, se presentan los resultados del mapeo de MO, P y pH de los suelos de la provincia de Córdoba, en su edición del año 2022, basados en estos avances y actualizaciones.

Materiales y Métodos

Datos

Los datos utilizados para el mapeo de las variables de suelo fueron obtenidos de diferentes instituciones públicas y privadas, siendo sistematizados para la versión 2022 más de 6.300 registros para cada variable. Las fuentes de datos incluyeron el Programa de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) de la Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAyG) de Córdoba, el Plan Mapas de Suelo del MAyG-INTA, así como la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Córdoba, la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Nacional de Río Cuarto y el Instituto Multidisciplinario de Biología Vegetal (IMBIV-CONICET). También se obtuvieron datos de empresas privadas, tales como Seiker (en 2020 y 2021), Orbely (entre 2020 y 2022), RAVIT (en 2021 y 2022) y AGD (en 2020).

Para la expresión de los valores se seleccionaron unidades de partes por millón (ppm) para el fósforo (P) y porcentaje (%) para la materia orgánica (MO). Todos los datos recolectados de perfiles de suelo o con más de una medición en profundidad fueron estandarizados

a una profundidad de 0-20 cm utilizando funciones de suavizado de áreas equivalentes (splines) (Malone et al., 2009). Además, se descartaron mediciones con más de 10 años, especialmente para las variables de MO y P. Por lo tanto, los registros de muestras recolectadas entre los años 2017 y 2022 representaron el 93% de los datos en MO y 95% en P y pH. Las bases de datos finales utilizadas como input de los modelos predictivos para el mapeo de variables presentaron entre 5.816 (pH) y 6.048 (MO) observaciones. El valor promedio del contenido de MO en las muestras fue de 2,17%, con una

variabilidad relativa al promedio del 53%. Los valores mínimos y máximos fueron de 0,10% y 13,20%, respectivamente. La variable de P mostró la mayor variabilidad relativa (CV=86%), con un valor promedio de 25,5 ppm y una mediana (percentil 50) de 18 ppm. Un 25% de los datos tuvieron valores por encima de 32,4 ppm (percentil 75) o por debajo de 10,9 ppm (percentil 25). Por otro lado, la media del pH fue de 6,54, con valores mínimos y máximos de 4 y 11, respectivamente. La distribución espacial de las muestras de MO se presenta en las Figura 1.

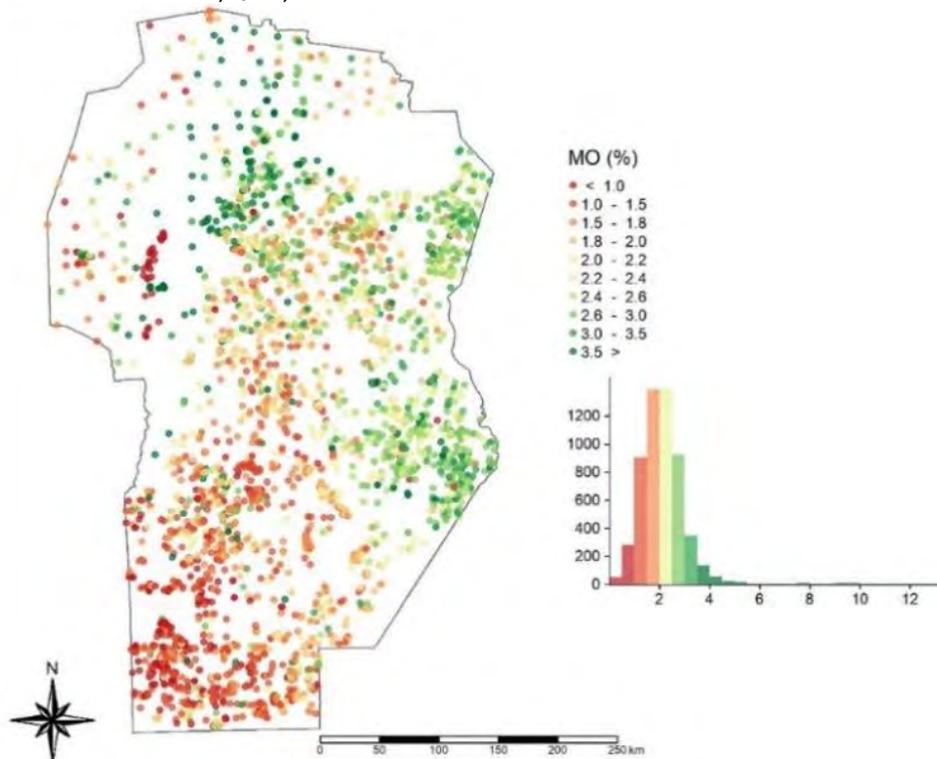


Figura 1. Distribución espacial de puntos de muestreo e histograma de frecuencias absolutas de valores de materia orgánica del suelo (MO) en la Provincia de Córdoba.

Metodología

Se realizaron diversas estrategias para la modelación de las variables de suelo, utilizando covariables que permiten explicar su variabilidad espacial. Entre las covariables utilizadas se destacan variables georreferenciadas referidas a otras propiedades del suelo, mapas de suelos preexistentes, datos de cobertura del suelo (land cover), índices de vegetación obtenidos con sensores remotos, mapas litológicos y variables extraídas desde modelos digitales de elevación (MDE), como atributos topográficos primarios y secundarios. Además, se incluyeron variables relacionadas con los cambios de productividad del suelo a lo largo del tiempo, que actúan como indicadores de la degradación del suelo (Teich et al., 2019). Se generó una grilla regular de 500 m × 500 m en toda el área provincial para la

predicción espacial, excluyendo áreas correspondientes a cuerpos de agua, zonas urbanas y salinas. En cada celda se registraron los valores de cada una de las covariables calculadas, las cuales se adicionaron a la base de muestras de las variables de suelo para el ajuste de los modelos predictivos. Se implementaron algoritmos de aprendizaje automático, entre los que se destacan los métodos basados en árboles como Random Forest (Breiman, 2001), Quantile Regression Forest (Meinshausen, 2006) y Extreme Gradient Boosting (Chen y Guestrin, 2016), así como métodos de regresión como Support Vector Machine (Zhang et al., 2004) y Cubist (Kuhn et al., 2016). Además, se utilizó información espacial en el análisis mediante técnicas geoestadísticas que permiten contemplar la estructura de correlación espacial

residual (Córdoba et al., 2021; Guo et al., 2015; Silatsa et al., 2020).

Para evaluar la capacidad predictiva de los modelos se utilizaron procedimientos de validación cruzada del tipo k-fold (k=10) repetido 10 veces, y se calcularon diversas medidas de cuantificación del error, como el error absoluto medio (MAE), la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio relativo a la media (MAPE), el porcentaje de varianza explicada (AVE) y el coeficiente de concordancia de Lin (LCC). Luego de seleccionar el modelo mediante estadísticas globales, se procedió a realizar la predicción de cada variable empleando la grilla de predicción generada previamente y se calculó la incertidumbre de predicción empleando la metodología sugerida en el contexto del MDS (Yigini et al., 2018; Hengli et al., 2018).

Resultados

Si bien algunas de las diferencias entre los métodos evaluados no resultaron significativas, el algoritmo Random Forest se destacó por su mejor desempeño en todas las variables analizadas, según la mayoría de las métricas utilizadas para la comparación de modelos. Los residuos de los modelos ajustados no presentaron estructuras de correlación espacial, por lo que no se requirió el uso de técnicas geoestadísticas complementarias. Los valores de error de predicción absoluto promedio (MAPE) obtenidos para los algoritmos seleccionados fueron de 4,7, 19,4 y 30,6% para pH, MO y P, respectivamente. La RMSE fue de 0,59% para MO, 15,3 ppm en P y 0,48 para pH. Los coeficientes de concordancia de Lin (LCC) se situaron en 0,85 para MO y 0,69 para P y pH, mientras que el coeficiente de determinación ajustado (AVE) osciló entre 0,73 (MO) y 0,50 (pH).

En la Figura 2 se muestra el mapa de predicción de cada variable, junto con su

respectivo nivel de incertidumbre. Este último se presenta como un valor porcentual expresado como el desvío estándar de la predicción relativo al valor predicho.

Para MO, el valor promedio de predicción fue de 2,32%. Del total de datos predichos, el 5% tuvo valores inferiores a 1,3% de MO, mientras que el 5% tuvo valores superiores a 3.75%. Los valores más bajos (<0.5%) se encontraron en las zonas de sierras, donde predomina la cobertura de tipo roca (Land Cover 2020/21), y los valores más altos (>4%) se registraron en la zona de piedemonte. Los valores de entre 1% y 1.5% se ubicaron en la zona sudoeste, mientras que en el centro norte, noreste y sudeste se observaron valores de entre 2,4% y 3%. Los valores de incertidumbre promedio fueron del 27%. Las áreas con una alta incertidumbre de predicción (CV>40) se correspondieron con la zona noroeste de la provincia, donde había una menor densidad de muestras para realizar la predicción espacial. Los valores promedio estimados de P fueron de alrededor de 24.7 ppm. El 25% de los datos predichos tuvieron valores inferiores a 17.5 ppm, mientras que el mismo porcentaje tuvo valores superiores a 31.5 ppm. Los valores más bajos (<10 ppm) se encontraron en la zona alta de la provincia (sierras), los valores entre 10 y 20 ppm se presentaron en la zona central y sur de la provincia, mientras que los valores superiores a 30 ppm se ubicaron en el norte, noreste y noroeste provincial. Al igual que para la variable MO, los valores de incertidumbre más altos se encontraron en la zona de las sierras, donde había una baja densidad de datos para el modelado. En cuanto al pH, el valor promedio de predicción fue de 6.64. Los valores más bajos (<5), que representan menos del 1% de los datos, se ubicaron en la zona de las sierras, mientras que los valores superiores a 7 se presentaron en la zona noroeste de la provincia y en las áreas de bañados y lagunas del sureste. Las áreas de mayor incertidumbre se correspondieron con las mismas zonas para MO y P.

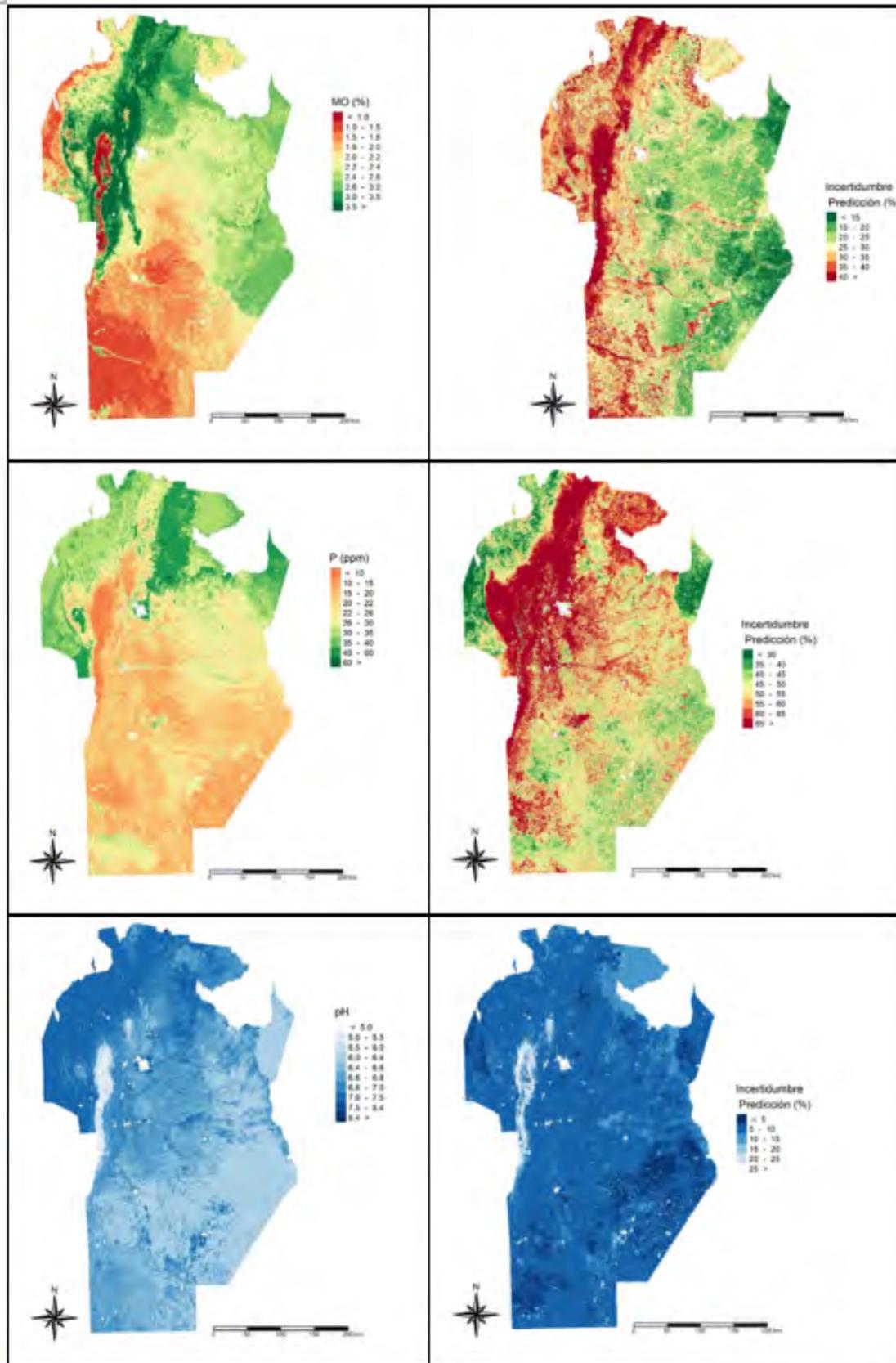


Figura 2. Mapas de predicción (izquierda) e incertidumbre de predicción (derecha) de materia orgánica (MO), fósforo (P) y pH del suelo en la Provincia de Córdoba.

Conclusiones

El presente trabajo documenta los avances realizados en la actualización de los mapas de

variables de suelo correspondientes a MO, P y pH para la provincia de Córdoba en 2022. Se destaca el incremento en la cantidad de datos utilizados para el modelado, lo que permitió obtener

predicciones más precisas y confiables. Los resultados muestran los contenidos promedio de estas variables para la provincia y su distribución espacial, así como los errores de predicción y los niveles de incertidumbre. La información generada es complementaria a las Cartas de Suelos y su uso conjunto contribuye al diagnóstico de la tendencia en el comportamiento de estas propiedades y para la detección temprana de procesos de degradación del suelo, lo que permitirá instrumentar condiciones de manejo apropiadas y políticas públicas adecuadas de planificación del uso de la tierra.

Bibliografía

- Breiman, L., 2001. Random Forests. *Mach. Learn.* 45, 5–32.
- Chen, T., Guestrin, C., 2016. XGBoost, in: *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. ACM, New York, NY, USA, pp. 785–794.
- Córdoba, M., Carranza, J.P., Piumetto, M., Monzani, F., Balzarini, M., 2021. A spatially based quantile regression forest model for mapping rural land values. *J. Environ. Manage.* 289, 112509.
- Guo, P.T., Li, M.F., Luo, W., Tang, Q.F., Liu, Z.W., Lin, Z.M., 2015. Digital mapping of soil organic matter for rubber plantation at regional scale: An application of random forest plus residuals kriging approach. *Geoderma* 237–238, 49–59.
- Hengl, T., Nussbaum, M., Wright, M.N., Heuvelink, G.B.M., Gräler, B., 2018. Random forest as a generic framework for predictive modeling of spatial and spatio-temporal variables. *PeerJ* 6, e5518.
- Kuhn, M., Weston, S., Keefer, C., Coulter, N., 2016. *Cubist Models for Regression*. R Packag. Vignette R Packag. version 0.0.
- Malone, B.P., Mcbratney, A.B., Minasny, B., Laslett, G.M., 2009. Geoderma Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity. *Geoderma* 154, 138–152.
- Meinshausen, N., 2006. Quantile regression forests. *J. Mach. Learn. Res.* 7, 983–999.
- Silatsa, F.B.T., Yemefack, M., Tabi, F.O., Heuvelink, G.B.M., Leenaars, J.G.B., 2020. Assessing countrywide soil organic carbon stock using hybrid machine learning modelling and legacy soil data in Cameroon. *Geoderma* 367, 114260.
- Zhang, L., Zhou, W., Jiao, L., 2004. Wavelet support vector machine. *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part B* 34, 34–39.

¿La estrategia de fertilización fosfatada afecta la dinámica del fósforo y su eficiencia de uso en el largo plazo?

Stefania C. Appelhans ^{a,b,c,*}, Leonardo E. Novelli ^{a,b,c}, Ricardo J.M. Melchiori ^c, Pedro A. Barbagelata ^{b,c}

^a CONICET, Argentina. ^b Facultad de Ciencias Agropecuarias – Universidad Nacional de Entre Ríos, Argentina. ^c INTA EEA Paraná, Argentina

Los desbalances de fósforo (P) de los sistemas agrícolas son un problema global porque tiene impactos tanto ambientales (e.g. eutrofización cuando hay excesos de fertilización con P) como también económicos (i.e. baja productividad de los cultivos en suelos deficientes en P). La aplicación de fertilizantes fosfatados para incrementar la disponibilidad de P en el suelo, parte del P aplicado se vuelve en fracciones menos disponibles reduciendo la eficiencia del uso de P (EUP). El legado de P incluye fracciones de P lábiles y moderadamente lábiles que podrían estar disponibles para los cultivos fertilizados en el largo plazo y afectar la EUP en el largo plazo. El objetivo de este trabajo fue evaluar la dinámica del P en el largo plazo y la EUP con diferentes estrategias y dosis de fertilización fosfatada en dos suelos de Entre Ríos, Argentina.

Se realizaron mediciones en dos ensayos de fertilización fosfatada de larga duración bajo siembra directa en suelos contrastantes (Molisol y Vertisol). El experimento evalúa la combinación de tres dosis iniciales (0, 100 y 200 kg P ha⁻¹) y cuatro dosis anuales de fertilización con P (0, 12, 24 y 36 kg P ha⁻¹). En todos los casos, la fuente utilizada fue superfosfato triple de Ca. Anualmente, se tomaron muestras de suelo a 0–5 cm, 5–10 cm y 10–20 cm de profundidad del suelo y se determinó la concentración de P-Bray 1. En el Molisol, el ensayo tuvo una secuencia de cultivos Trigo/soja-Maíz, y en el Vertisol

Trigo/soja – Maíz – Soja. Anualmente se determinó el rendimiento de los cultivos, la concentración de P en granos (mg g⁻¹) y la EUP (kg P extraído en grano acumulado/ kg de P aplicado acumulado en 10 años)

Los efectos de la fertilización inicial con P sobre el P-Bray 1 se observaron durante más años en el Molisol, en comparación con el Vertisol. Sin embargo, la fertilización anual con P aumentó el P-Bray 1 en profundidad antes en el Vertisol que en el Molisol. Después de 10 años de fertilización continua, la estratificación del P-Bray 1 en el suelo Vertisol fue el doble de la registrada en el suelo Molisol. Esto sugiere, una mayor sensibilidad a los cambios en el nivel de P-Bray 1 con la fertilización fosfatada en el suelo Vertisol. Además, la fertilización inicial con P afectó el P-Bray 1 solo en el sitio Molisol y, a medida que se incrementó la dosis de fertilización inicial, disminuyó la dosis anual de fertilización requerida para mantener el nivel inicial de P-Bray 1 (Figura 1).

Los resultados obtenidos muestran que la estrategia de fertilización anual con P para satisfacer las necesidades de los cultivos, produjo una EUP más alta en comparación con el uso del legado de P residual derivado de una dosis de fertilización inicial alta y única (Figura 2). La relación entre la EUP y el P aplicado acumulado no se vio afectada por el tipo de suelo.

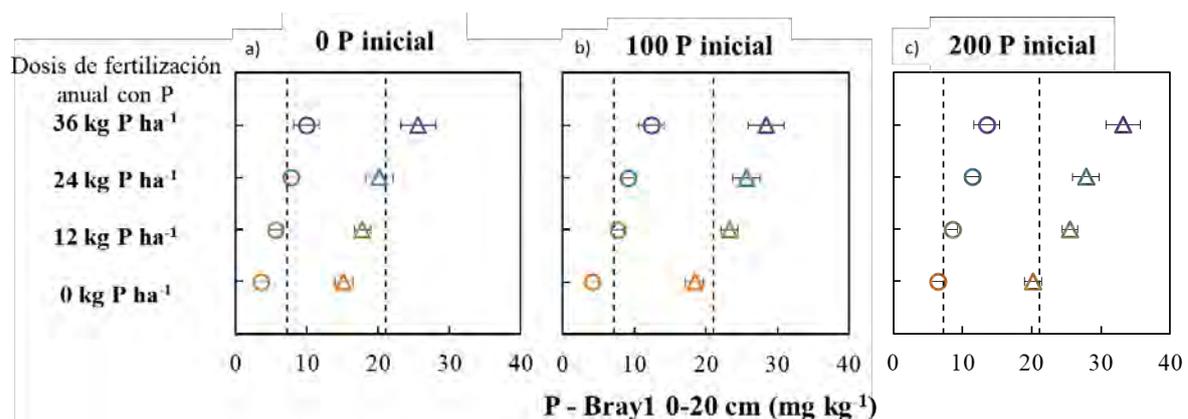


Figura 1. Cambios en el P-Bray 1 del suelo (de 2015 a 2017) respecto al nivel inicial para las diferentes dosis anuales de fertilización fosfatada y las tres dosis iniciales de fertilización con P: (a) 0 kg P ha⁻¹, (b) 100 kg P ha⁻¹, (c) 200 kg P ha⁻¹

¹. Los círculos representan datos del sitio Vertisol y los triángulos representan datos del sitio Molisol. La línea punteada representa el nivel inicial de P-Bray 1 en cada sitio. Las barras representan la desviación estándar.

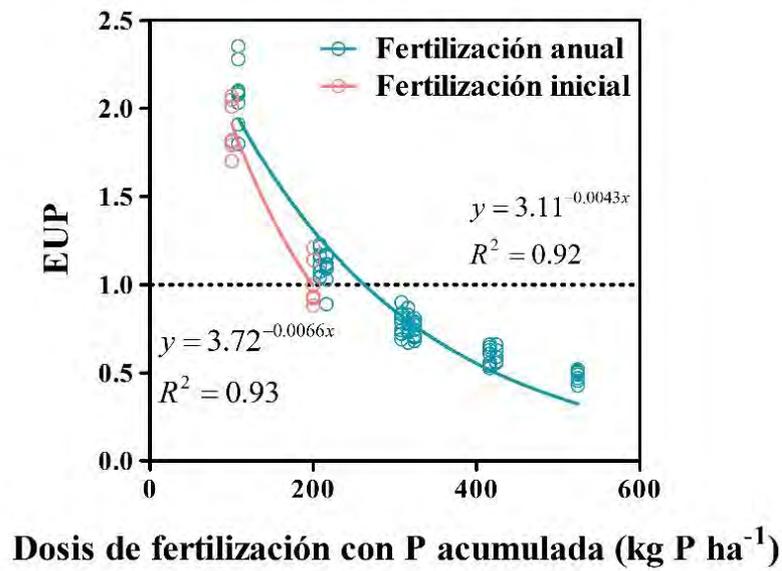


Figura 2. Relación entre la eficiencia de uso de fósforo (EUP) y la dosis de fertilización con P acumulada (kg P ha⁻¹) durante 10 años en dos sitios en Oro Verde, Argentina.

Fracciones de fósforo y azufre en el suelo en respuesta a la fertilización en distintos suelos del sur de Santa Fe

Biassoni M.M.¹, García F.², Gallo S.³, Permingeat F.³, Pozzi R.³, Rovea A.³, Gutiérrez Boem, F.⁴, Salvagiotti F¹.

¹EEA INTA Oliveros-CONICET; ²Consultor privado; ³Región CREA Sur de Santa Fe; ⁴Catedra de Fertilidad y Fertilizantes- FAUBA
biassoni.micaela@inta.gob.ar

Introducción

El fósforo (P) y el azufre (S) son macronutrientes que limitan la producción de los cultivos en la región pampeana. Sin embargo, se han encontrado efectos residuales en el rendimiento de los cultivos como consecuencia de la aplicación de fertilizantes con P y S en cultivos predecesores (Salvagiotti et al., 2004), donde los mismos no son perdidos del sistema, sino que pueden ser utilizados por los cultivos siguientes (García et al., 2011). En este sentido, el uso de técnicas de fraccionamiento de P y S en el suelo como indicadores químicos del suelo, es una herramienta útil para identificar la capacidad potencial de los suelos de proveer nutrientes que están almacenados en las mismas (Biassoni et al., 2020; 2022).

El objetivo de este trabajo fue describir las fracciones de P y S en suelos con distinto manejo de la fertilización y los cambios provocados por el manejo de la fertilización con P y S en el largo plazo.

Materiales y métodos

En cinco ensayos de larga duración correspondientes a la red de ensayos de larga duración del grupo CREA Sur de Santa Fe, cuyo objetivo es evaluar el efecto de diferentes planteos de fertilización en rotaciones agrícolas sobre el rendimiento de los cultivos y la fertilidad

del suelo se tomaron muestras de suelo luego de 19 años del inicio. Los experimentos comenzaron en la campaña 2000/01 conducidos bajo siembra directa en suelos Hapludoles y Argiudoles con diferente historial de manejo. En dos experimentos (Balducci y San Alfredo) se realiza una rotación maíz de primera - doble cultivo trigo/soja (M-T/S), mientras que en los otros tres experimentos (La Blanca, La Hansa y Lambaré) la rotación es maíz, soja de primera y doble cultivo trigo/soja (M-S-T/S). Las muestras de suelo se recolectaron en el año 2019 a 20 cm de profundidad en cuatro tratamientos: i) testigo control sin fertilización, ii) fertilización con N y P (NP), iii) fertilización con N y S (NS) y iv) fertilización con N, P y S (NPS). Las aplicaciones de fertilizantes con P y S se realizaron con dosis estimadas para la reposición de la extracción de estos nutrientes en grano más el 10%, de manera de generar balances positivos de ambos nutrientes en el suelo, con un rango de 20-46 y 19-25 kg ha⁻¹ para P y S, respectivamente, siendo las fuentes fosfato monoamónico y yeso, mientras que el N se aplicó en forma de Urea en trigo y maíz con dosis de N no limitantes para el rendimiento esperado.

En cada muestra, se realizaron los fraccionamientos químicos de P por el método de Hedley (1962) modificado por Tiessen y Moir (1993) y S por el método de Johnson y Nishita (1952) como se muestra en la Figura 1.

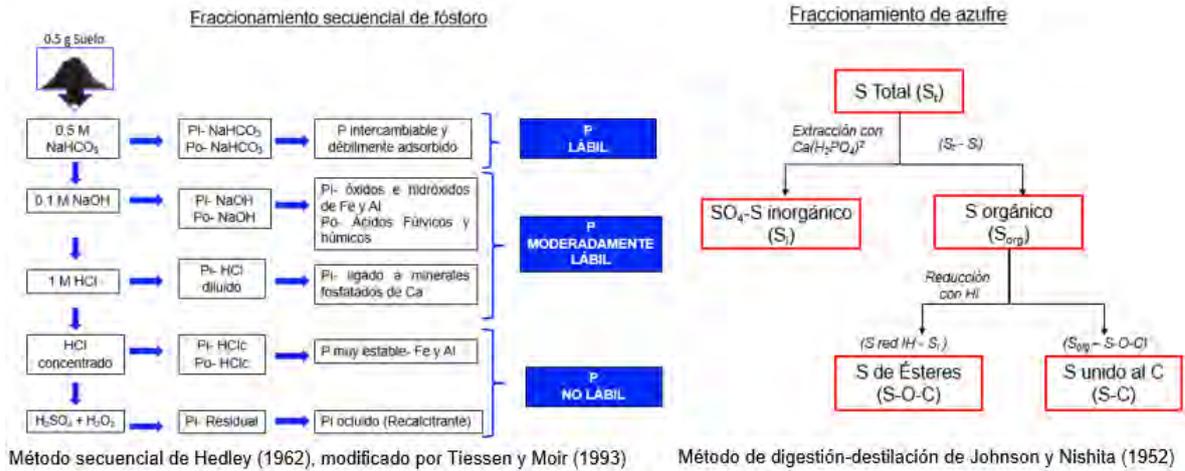


Figura 1. Procedimiento del fraccionamiento químico de P y S en el suelo.

Resultados

Fracciones de P

El contenido promedio de P total fue de 447, 468, 514, 528 y 570 mg kg⁻¹ para Balducci, San Alfredo, La Blanca, La Hansa y Lambaré respectivamente, con diferencias significativas entre los sitios ($p < 0,05$). El contenido promedio de P total en La Blanca y La Hansa fueron un 14% mayor que el de Balducci y San Alfredo, mientras que el P total de Lambaré fue 24% mayor respecto a ésta. Del P total, el 10% en promedio representa el pool lábil, el 60% el pool moderadamente lábil, y el 30% el pool no lábil (Figura 2).

Se encontraron diferencias significativas entre sitios ($p < 0,01$) en todas las fracciones de P, mientras que sólo hubo diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,01$) para las fracciones inorgánicas lábiles (Pi lábil) y moderadamente lábiles (Pi mod lábil) (Figura 2). La fracción Pi lábil, con un promedio de 22, 9, 27, 12 y 27 mg kg⁻¹ para los tratamientos sin fertilización con P de Balducci, San Alfredo, La Blanca, La Hansa y Lambaré, respectivamente, se incrementaron un 100, 155, 44, 142 y 109%, respectivamente, en los tratamientos que recibieron P, con respecto a los tratamientos sin P. Asimismo, el pool de P inorgánico moderadamente lábil, (Pi-NaOH +

Pi-HCl 1M), con un promedio de 74, 68, 83, 61 y 88 mg kg⁻¹ para los tratamientos sin fertilización con P de Balducci, San Alfredo, La Blanca, La Hansa y Lambaré, respectivamente, se incrementaron un 29, 21, 20, 30 y 25%, respectivamente, en los tratamientos que recibieron P, con respecto a los tratamientos sin P. Por último, el pool de P no lábil tuvo en promedio 108, 190, 178, 175 y 128 mg kg⁻¹ sin diferencias entre tratamientos de fertilización ($p > 0,05$). Curiosamente, en Balducci y San Alfredo, con rotaciones de cultivos intensivas de M-T/S, también se encontraron diferencias significativas en la fracción orgánica lábil, con un promedio de 16 y 6 mg kg⁻¹ respectivamente, para los tratamientos sin fertilización con P, incrementándose hasta un 91 y 158%, respectivamente, en los tratamientos que recibieron fertilización con P (Figura 2).

Estos resultados concuerdan con otros estudios donde el P proveniente de los fertilizantes y que no fue absorbido por los cultivos se acumuló en fracciones inorgánicas lábiles y moderadamente lábiles del suelo (Ciampitti et al., 2011; Biassoni et al., 2020), demostrando ser responsables de la residualidad de la fertilización fosfatada en ensayos de larga duración.

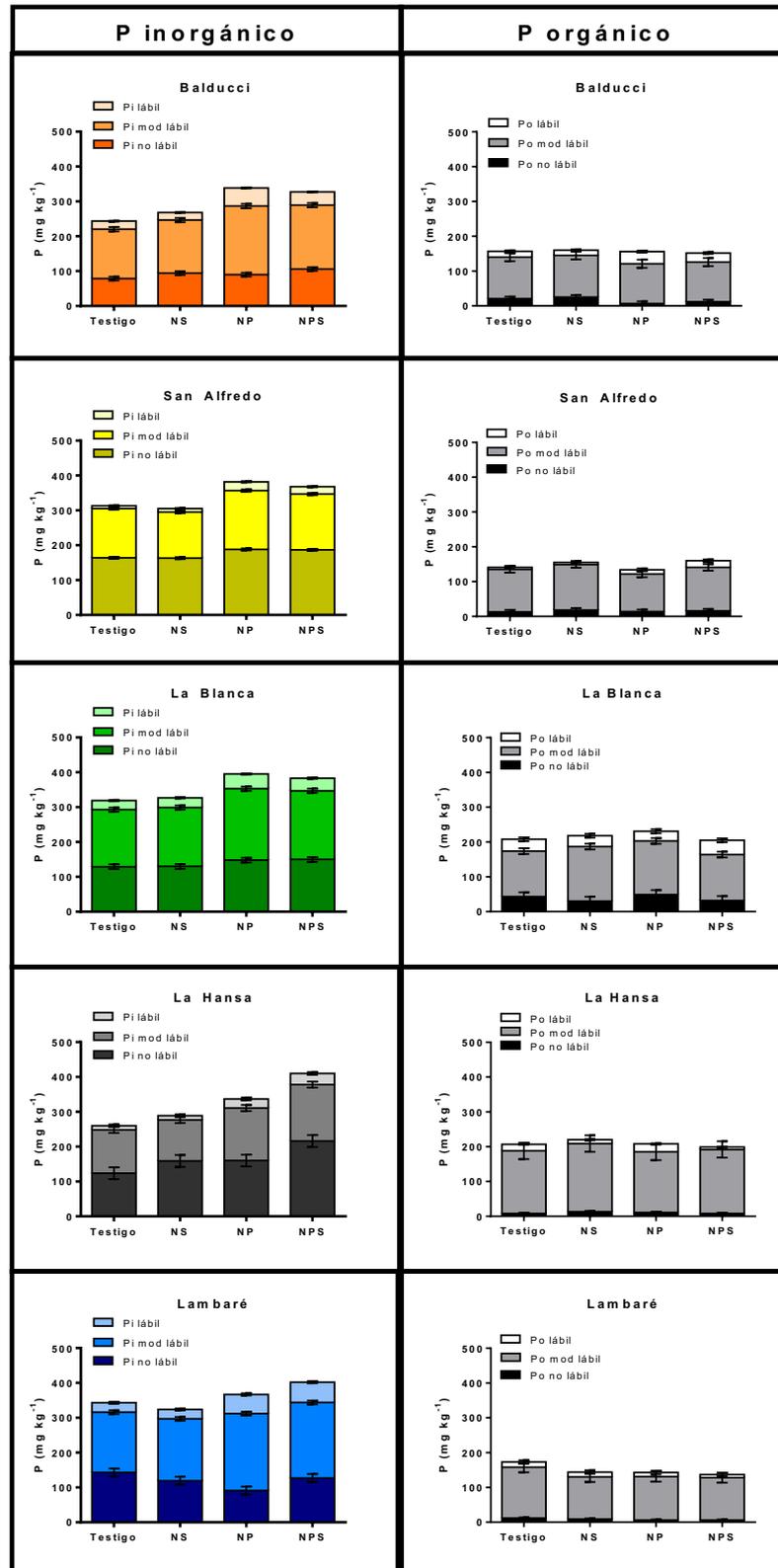


Figura 2: Contenido de P inorgánico (Pi) y P orgánico (Po) en las fracciones de P del suelo con distinta labilidad según tratamientos de fertilización luego de 19 años en cinco experimentos de larga duración en el centro-sur de Santa Fe.

Fracciones de S:

El contenido promedio de S total (St) fue de 137 mg kg⁻¹, sin diferencias significativas entre sitios ($p > 0,05$) y el 96% en promedio correspondió a S

orgánico. El fraccionamiento químico mostró que el S inorgánico (Si) representó entre 2-7% con respecto al St, mientras que las fracciones S de ésteres (S-O-C) y S unido al C (S-C)

representaron entre 30-70%. Estos datos concuerdan con lo observado por Mizzuno et al., (1990) para suelos Molisoles de la provincia de Buenos Aires.

La fracción de S inorgánico presentó diferencias significativas según tratamientos de fertilización ($p < 0.05$), con un promedio de 5 mg kg^{-1} para los tratamientos sin fertilización con S, incrementándose hasta un 45% en los tratamientos que recibieron fertilización azufrada (Figura 3). La fracción orgánica lábil i.e., S de ésteres (S-O-C), presentó diferencias significativas entre tratamientos de fertilización ($p < 0.05$), con un promedio de 56 mg kg^{-1} en los tratamientos sin S, incrementándose en promedio un 49% en los tratamientos que recibieron fertilización azufrada en todos los sitios (Figura 3). Por último, la fracción orgánica recalcitrante i.e., S unido al C (S-C), no presentó diferencias significativas entre sitios ni tratamientos de fertilización ($p < 0.05$), con un promedio de 68 mg kg^{-1} (Figura 3). Estos resultados concuerdan con otros estudios donde luego de 10 años de aplicación acumulada de fertilizantes azufrados, el S proveniente de los fertilizantes y que no fue absorbido por los cultivos se acumuló en las fracciones de S inorgánico (Si), S de ésteres (S-O-C), demostrando ser responsables de la residualidad de la fertilización azufrada (Biassoni et al., 2022). En línea con esto, otros trabajos muestran que aun cuando los sulfatos del suelo (Si) son una fuente directa de S para las plantas, los S de ésteres (S-O-C) juegan un papel importante en la liberación de sulfato a corto plazo, contribuyendo al aporte de S a las plantas por medio de la mineralización (Goh & Pamidi, 2003; Wilhelm Scherer, 2009).

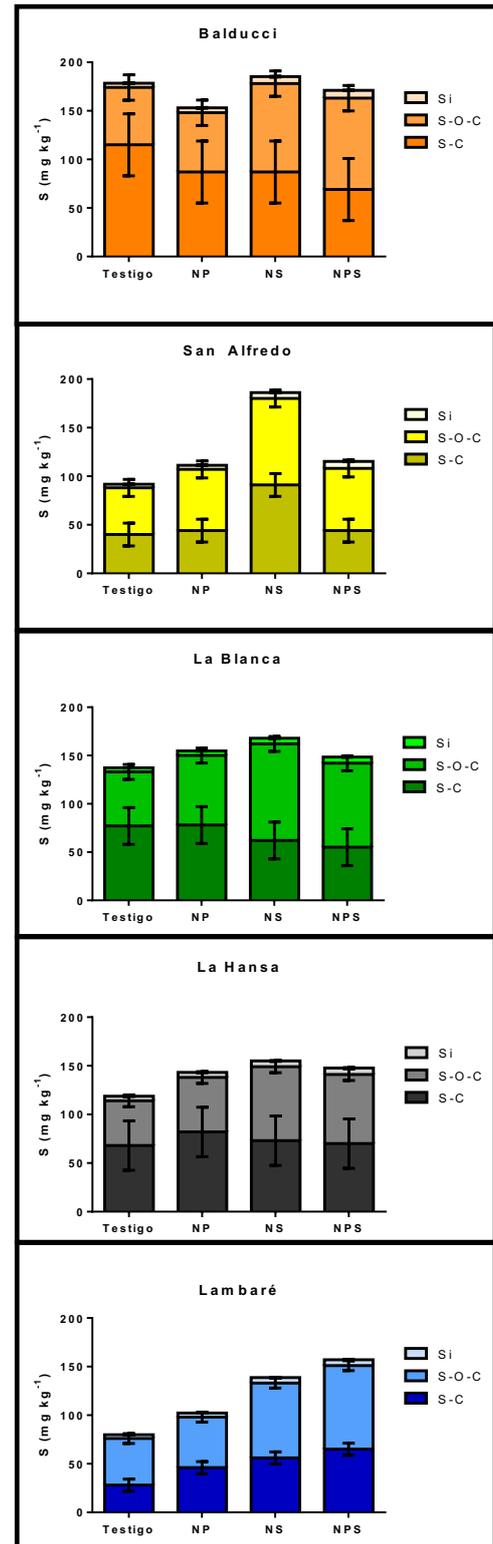


Figura 3: Contenido en las fracciones de S del suelo según tratamientos de fertilización aplicados durante 19 años en cinco experimentos de larga duración en el centro-sur de Santa Fe.

Conclusión

Luego de 19 años de aplicación continua de fertilizantes en cinco sitios de la región centro-sur de Santa Fe con P y S:

i) el P se acumuló en las fracciones inorgánicas de P lábil y moderadamente lábiles, excepto en Balducci y San Alfredo con rotaciones más intensivas, donde también se acumuló en la fracción orgánica lábil.

ii) el S se acumuló en las fracciones más lábiles del suelo: S inorgánico (Si) y S de ésteres (S-O-C).

Bibliografía

- Biassoni, M. Micaela; Flavio H. Gutiérrez Boem; H. Vivas; Fernando Salvagiotti. "Fracciones de fósforo (P) asociadas a la residualidad de la fertilización fosfatada". XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, ISBN 978-987-46870-3-6. Corrientes, 2020.
- Biassoni, M. Micaela; H. Vivas, D.A. Carreira; F.H. Gutiérrez Boem; F. Salvagiotti. "Indicadores de residualidad del azufre en el suelo en respuesta a la fertilización azufrada". Exposición oral en el XXVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Buenos Aires, 2022. ISBN 978-987-48396-7-1
- Ciampitti IA; LI Picone; G Rubio & FO García. 2011. Pathways of phosphorous fraction dynamics in field crop rotations of the Pampas of Argentina. Soil. Sci. Soc. Am. J 75(3), 918-926.
- García, F, Fontanetto, H., and Vivas, H. La Fertilización del Doble Cultivo Trigo-Soja. Informaciones Agronómicas del Cono Sur 10, 14-17. 2001. Acassuso, Bs As, Argentina.
- Goh, K. M., & Pamidi, J. (2003). Plant uptake of sulphur as related to changes in the HI-reducible and total sulphur fractions in soil. Plant and Soil, 250(1), 1-13.
- Hedley MJ; JW Stewart and BS Chauhan. 1982. Changes in Inorganic and Organic Soil Phosphorus Fractions Induced by Cultivation Practices and by Laboratory Incubations1. Soil Sci. Soc. Am. J. 46:970-976
- Johnson, C. M., & Nishita, H. (1952). Microestimation of sulfur in plant materials, soils, and irrigation waters. Analytical chemistry, 24(4), 736-742.
- Mizuno, J., de Lafaille, B., & de López Camelo, L. G. (1990). Caracterización del azufre en algunos molisoles de la provincia de Buenos Aires. Ciencia del Suelo, 8(2), 111-117.
- Salvagiotti F; G Gerster; S. Basigaluppo; J Castellarin; C Galarza; N Gonzalez; V Gudelj; O Novello; H Pedrol and P Vallone. 2004. Efectos Residuales y Directos de Fósforo y Azufre en el Rendimiento de Soja de segunda. Ciencia del Suelo 22:92- 101
- Wilhelm Scherer, H. (2009). Sulfur in soils. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 172(3), 326-335.

Estudio de la interacción entre cultivar, densidad y fertilización nitrogenada en maíz

Fecha de siembra temprana

Gustavo N. Ferraris¹, Eduardo Mancuso² y Juan Cuirolo²

INTA EEA Pergamino¹, Syngenta Agro SA².
Contacto: ferraris.gustavo@inta.gob.ar.

Genética, densidad y nivel de nitrógeno son tres factores esenciales en el manejo de maíz. Determinan el nivel de inversión, y están íntimamente asociados al rendimiento objetivo. Junto a la fecha de siembra, son los factores de variación más frecuente en planteos agronómicos lote a lote o intra – lote, en caso de manejo sitio específico. En este trabajo, se plantea estudiar su interacción, en fecha de siembra temprana bajo estrés hídrico severo. La elección del cultivar y ajuste de nitrógeno presentaron diferencias entre niveles. Los genotipos evaluados se comportaron mejor en densidades bajas y con alta fertilización, pero con diferencias entre sí.

Palabras clave: Maíz, sistemas, siembra temprana, estrés hídrico, nitrógeno, interacciones, manejo adaptativo.

Introducción

El presente experimento aborda un aspecto relevante del manejo agronómico del maíz, como es la interacción entre genética, densidad, y fertilización nitrogenada. Existe fuerte evidencia que la respuesta a densidad y fertilización es sitio específico, y que diferentes genotipos expresan un comportamiento diferencial a estos factores. La dificultad de este enfoque reside en que, mientras los ambientes son relativamente estables en el tiempo, el permanente recambio varietal dificulta ajustar el comportamiento de los cultivares, exigiendo un gran esfuerzo de investigación a corto plazo.

La fecha de siembra temprana es la más sensible a cambios en la oferta de recursos. El nivel más bajo de nitrógeno (N) en suelo y el balance hídrico ajustado generan una singular sensibilidad del cultivo al manejo. El desencadenamiento de un ciclo La Niña durante las últimas campañas determina una fuerte reducción en las precipitaciones acompañado de incremento de las temperaturas, acentuando el efecto varietal sobre la tolerancia a la competencia intraespecífica, y la capacidad de aprovechar el N.

El objetivo de este trabajo de investigación es describir el comportamiento agronómico de diferentes materiales comerciales frente a cambios en la densidad de siembra y la fertilización nitrogenada en siembra temprana, en un ciclo caracterizado por las bajas precipitaciones y altas temperaturas alrededor de

floración. Hipotetizamos que: 1. La reducción de la densidad y el incremento de la fertilización permiten mitigar los efectos de un estrés hídrico pronunciado, y 2. Diferentes genotipos presentan una respuesta particular a fertilización y densidad, y optimizan su productividad a una combinación de dichos factores que origina la necesidad de recomendaciones específicas por cultivar.

Materiales y métodos

Durante la campaña 2021/22, se realizó un experimento de campo en la EEA INTA, sobre un suelo Serie Pergamino, Argiudol típico, (USDA-Soil Taxonomy V. 2006), capacidad de uso: I-2. Se sembró el día 24 de septiembre en forma mecánica, logrando las densidades objetivo por raleo. Fue espaciado a 0,7 m entre hileras. Las unidades experimentales fueron de 21 m², y la superficie cosechada 5 m². Se fertilizó con 100 kg/ha de MAP a la siembra y 100 kg/ha de sulfato de calcio en cobertura total, también durante la siembra. El diseño correspondió a bloques completos aleatorizados con 2 repeticiones, con arreglo factorial completo de los tratamientos. Se estudió la interacción entre los factores genotipo, densidad y fertilización nitrogenada. Los niveles de estos factores se presentan en la Tabla 1. El objetivo de N se logró mediante la aplicación de urea granulada en post-emergencia temprana, considerando también el aportado por MAP en línea y el disponible en forma de N-nitratos en suelo, a 60 cm de profundidad.

Tabla 1: Factores y niveles evaluados en el experimento. Fecha de siembra temprana. Campaña 2021/22.

Factor 1: Genotipo	Factor 2: Densidad	Factor 3: (N suelo + fertilizante)
Syngenta NK 979 Vip3 Syngenta NK 897 Vip3 Syngenta NK 897 Vip3	60000 pl/ha 75000 pl/ha 90000 pl/ha	140 kgN/ha 180 kgN/ha 240 kgN/ha

Tabla 2: Análisis de suelo efectuado al momento de la siembra (0-20 cm).

Materia Orgánica	N total	Fósforo extractable	pH	N-Nitratos suelo 0-60 (septiembre)	S-Sulfatos suelo	Agua en suelo
%	%	mg kg ⁻¹	agua 1:2,5	kg/ha	mg/kg	150 cm - siembra
2,47	0,124	16,2	5,6	41,6	10,7	130 mm
muy bajo	muy bajo	medio	ácido	bajo	alto	bajo
Potasio	Calcio	Magnesio	Zinc	Boro	Mn	Hierro
mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
461	1573	252	0,49	0,64	36,5	59,2
muy alto	muy alto	muy alto	muy bajo	bajo	muy alto	muy alto

La cosecha se realizó en forma manual, recolectando 5 m² por parcela, el día 9 de marzo, con trilla estacionaria de las muestras. Para el estudio de los resultados se realizaron análisis de la varianza, comparaciones de medias y análisis de regresión.

Resultados y discusión

El almacenaje inicial de agua disponible en el suelo fue moderado (130 mm, Tabla 2), a causa de un final de invierno y comienzo de primavera

medianamente secos. La escasez de lluvias se mantuvo durante el ciclo del cultivo, agotando la humedad de los suelos. Las precipitaciones alcanzaron valores por debajo de la media hasta la segunda década de febrero, con registros especialmente bajos hacia finales de diciembre (Figura 1). Se registraron temperaturas extremadamente elevadas pocos días después de la floración. Esto ocurrió en la tercera década de diciembre, y nuevamente en enero (Figura 2), configurando un golpe de calor en el período crítico.

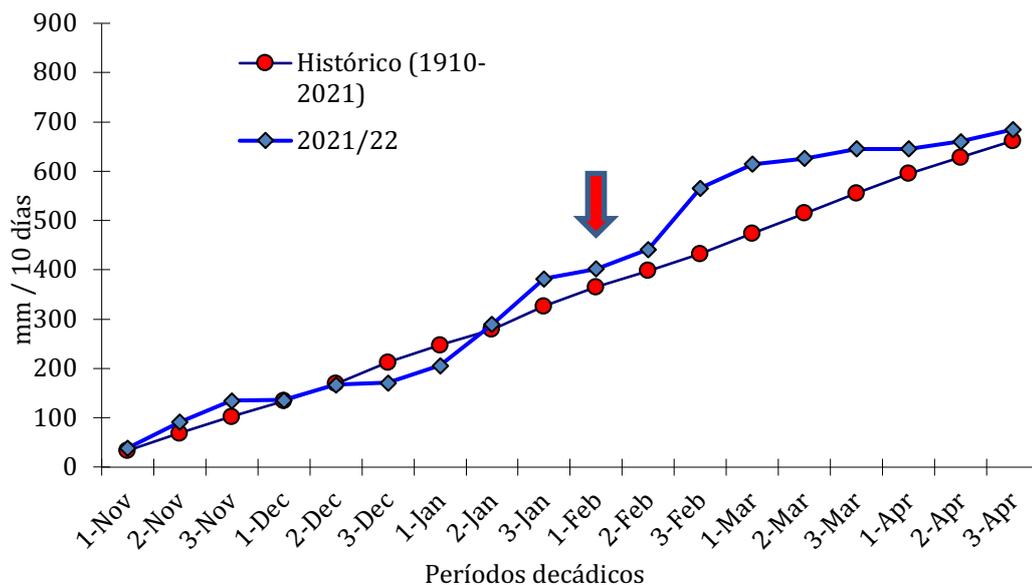


Figura 1. Precipitaciones decádicas acumuladas del ciclo 2021-22, y su comparación con la media histórica. Maíz de siembra tardía, localidad de Pergamino. La flecha indica la ocurrencia de floración femenina. Agua útil inicial (150 cm) 204 mm. Precipitaciones totales durante el ciclo de cultivo 684,6 mm.

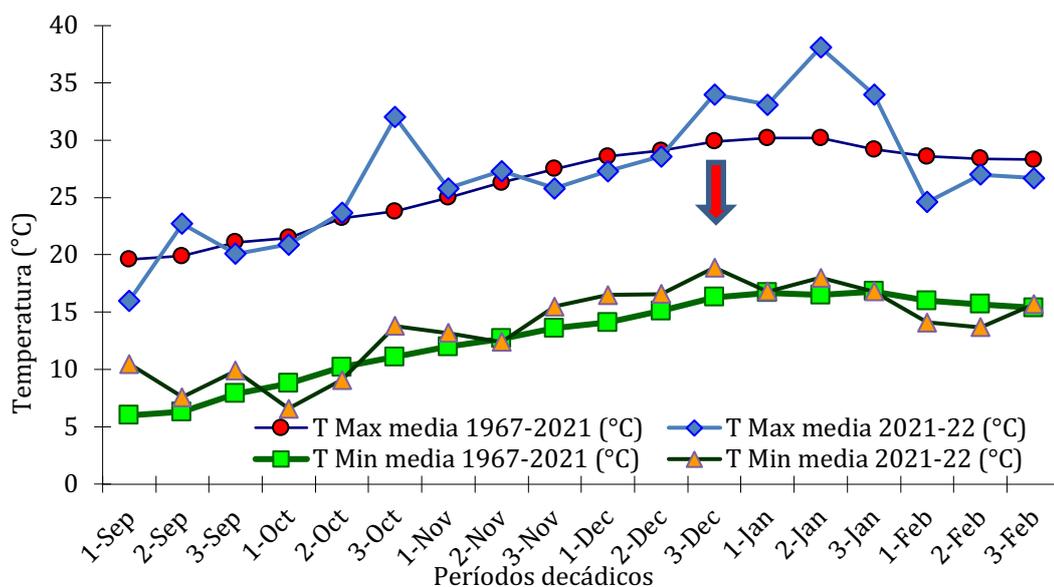


Figura 2: Temperaturas decádicas del ciclo 2021/22, comparadas al valor histórico 1967-2021. La temperatura máxima media durante el ciclo de cultivo fue superior a la histórica en 0,7 °C, y la mínima media en 0,9 °C. Agrometeorología EEA INTA Pergamino.

Resultados del experimento

En la Tabla 3 se presentan los promedios para rendimiento de grano de los efectos simples y su

significancia estadística, mientras que en la Figura 3 se ilustran los rendimientos por tratamiento.

Tabla 3: Comparación de medias para rendimiento (LSD $\alpha=0,05$) de los efectos simples de híbrido, densidad y nitrógeno. Fecha de siembra temprana. Pergamino, campaña 2021/22.

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=1229,80233 Error: 3083850,5679 gl: 18				
Cultivar	Medias	n	E.E.	
NK 890 Vip3	9487	18	413,91	A
NK 979 Vip3	8815	18	413,91	A B
NK 897 Vip3	7687	18	413,91	B
Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=1229,80233 Error: 3083850,5679 gl: 18				
Densidad	Medias	n	E.E.	
60000	9188	18	413,91	A
75000	8652	18	413,91	A
90000	8150	18	413,91	A
Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=1229,80233 Error: 3083850,5679 gl: 18				
Nitrógeno	Medias	n	E.E.	
220	9658	18	413,91	A
180	8778	18	413,91	A B
140	7554	18	413,91	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Los rendimientos de **siembra temprana** estuvieron limitados por agua y fertilidad, y alcanzaron una media de 8663 kg ha⁻¹. Esta productividad se encuentra por debajo del potencial genético y las posibilidades del ambiente. La escasez de precipitaciones y especialmente las altas temperaturas de finales de diciembre representan una restricción al rendimiento, no obstante, sirven para evaluar la estabilidad de los cultivares y la respuesta al manejo adaptativo.

Se determinaron diferencias significativas por efecto de N ($P=0,007$) y Cultivar ($P=0,02$), aunque no interacciones entre factores ($P>0,05$) ni efecto de densidad ($P>0,05$). Entre los cultivares, Syngenta NK 890 Vip3 fue el de mayor rendimiento ($P<0,05$), superando a NK 897 Vip3. NK 979 Vip3 se ubicó en un nivel medio, sin diferencias con los anteriores (Tabla 3). Con relación a densidad, en promedio 60 mil plantas/ha (pl/ha) se destacó por sobre 75 mil pl/ha y esta superó a 90 mil pl/ha (Tabla 3 y Figura 3). Estos resultados significan una diferencia respecto de los ciclos 2019/20 y 2020/21, donde 75 mil pl/ha se constituyó en la población más destacada (Ferraris et al., 2020). Las diferentes densidades presentaron similar número de espigas logradas m², ajustando el índice de prolificidad y la fracción de plantas improductivas. Este comportamiento también

fue observado por D'Andrea et al. (2022). Por encima de la densidad que toleró el ambiente, las plantas en exceso resultaron estériles e improductivas, como reportaron Adebayo & Sebetha (2020), y Li et al., (2020).

Los genotipos presentaron un comportamiento diferente frente a la densidad, representado por la distancia entre las curvas (Figura 3). NK 890 Vip3 se mostró más tolerante, alcanzando el rendimiento máximo en el nivel medio de 75 mil, en comparación con NK 979 Vip3 y NK 897 Vip3 que bajaron su producción en la densidad media, y sobre todo en la máxima. La mayor tolerancia a densidades altas de NK 890 se había logrado comprobar en campañas anteriores (Ferraris et al., 2020).

El cultivar con mayor respuesta a N fue NK 979 Vip3, mientras que NK 890 Vip3 se evidenció como el más estable. La combinación de mayor rendimiento fue NK 979 Vip3, en 90 mil pl/ha y N240 (11629 kg/ha) (Figura 3). Por su parte, la de menor productividad fue NK 897 Vip3, en 75 mil plantas y N140 (6148 kg/ha). El incremento en el ajuste de N se asocia a mayor rendimiento, siempre que no se encuentre a una densidad excesiva, que genere plantas improductivas. El comportamiento resulta diferencial entre materiales, aun cuando no se manifieste en interacción estadística cultivar x densidad.

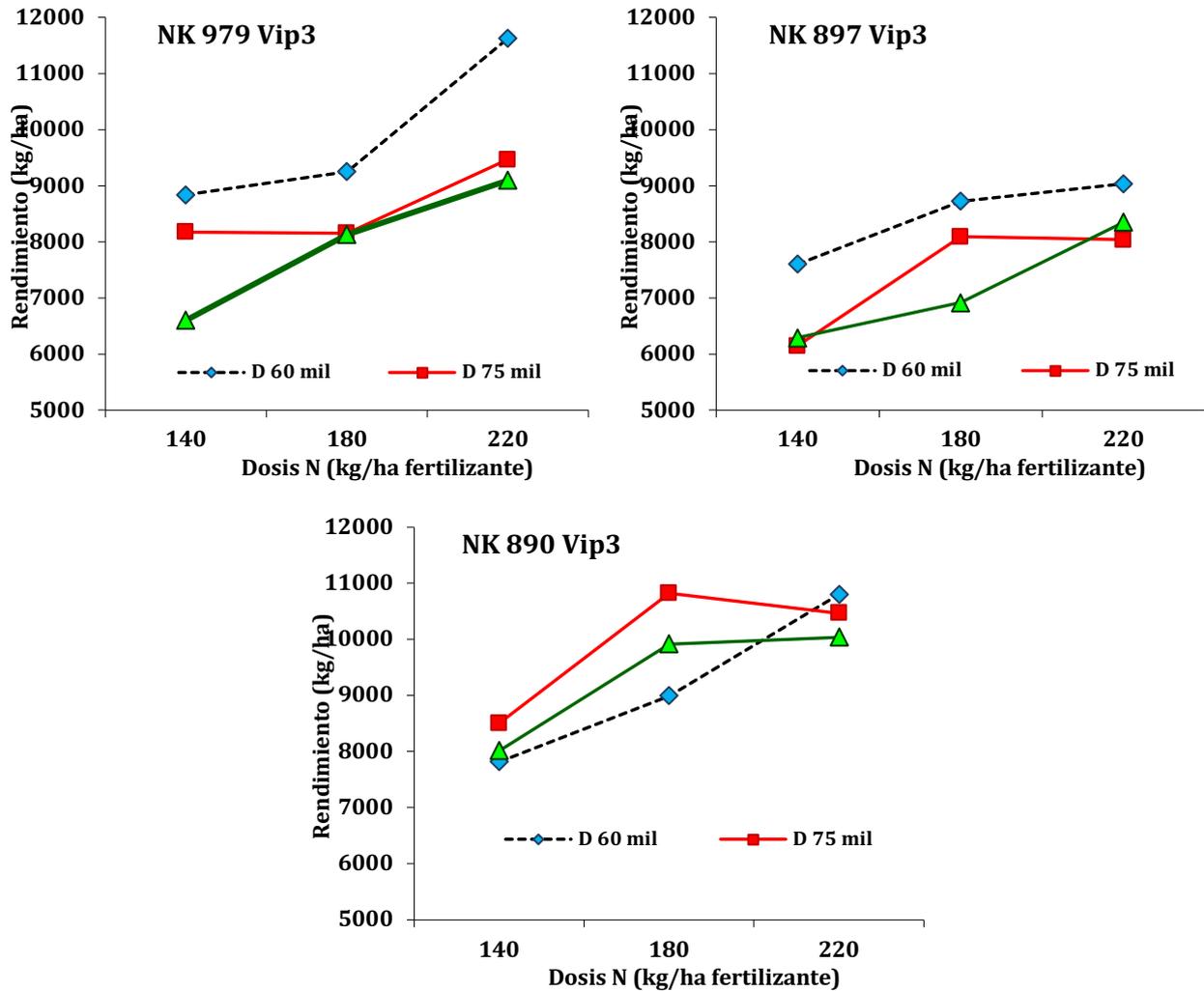


Figura 3: Producción media (kg ha⁻¹) según genotipo, tratamientos de densidad y fertilización nitrogenada en maíz. INTA Pergamino, maíz de siembra temprana, ciclo 2021/22.

Los resultados obtenidos permiten aceptar la hipótesis 1. El manejo de densidad y fertilización permitió mejorar el rendimiento de los genotipos, y permite inferir mayor eficiencia de uso del agua. Este manejo no necesariamente significa incrementar la fertilización o la población de plantas. La hipótesis 2 es también aceptada. Los cultivares presentaron un patrón general hacia mayores rendimientos en densidades bajas y buen nivel de N, con variantes entre sí.

Bibliografía

Adebayo, A. R., & Sebetha, E. T. (2020). Data on influence of different nitrogen fertilizer rates and plant density on grain yield and yield

components of Water Efficient Maize (WEMA) variety. *Data in brief*, 30, 105582.

D'Andrea, K. E., Parco, M., & Maddonni, G. Á. (2022). Maize prolificacy under contrasting plant densities and N supplies: II. Growth per plant, biomass partitioning to apical and sub-apical ears during the critical period and kernel setting. *Field Crops Research*, 284, 108557.

Ferraris, G. N., Lopez, M., Barberis, S., Mancuso, E., & Cuirolo, J. (2020). Estudio de la interacción entre cultivar, densidad y fertilización nitrogenada según fecha de siembra maíz-Campaña 2019/20. EEA Pergamino, INTA, Repositorio INTA.

Li, G., Wang, L., Li, L., Lu, D., & Lu, W. (2020). Effects of fertilizer management strategies on maize yield and nitrogen use efficiencies under different densities. *Agronomy Journal*, 112(1), 368-381.

Estudio de la interacción entre cultivar, densidad y fertilización nitrogenada en maíz

Fecha de siembra tardía

Gustavo N. Ferraris¹, Eduardo Mancuso² y Juan Cuirolo²

INTA EEA Pergamino¹, Syngenta Agro SA².
Contacto: ferraris.gustavo@inta.gob.ar

Genética, densidad y nivel de nitrógeno son esenciales en el manejo de maíz. La fecha de siembra tardía por lo general representa un ambiente mejorado en la oferta de agua y nutrientes respecto de las tradicionales. Esto se ve potenciado en ciclos bajo el evento La Niña, en las cuales el máximo de precipitaciones se traslada desde la primavera al verano – otoño. El cambio de escenario podría significar diferentes recomendaciones en los niveles de los factores. En el presente trabajo, el oportuno retorno de las lluvias y la mitigación de altas temperaturas permitieron la expresión de altos rendimientos en siembras tardías. La interacción genotipo x densidad resultó significativa para rendimiento. La combinación óptima de nitrógeno y densidad fue diferente según cultivar. Se plantea hasta qué punto la intensificación productiva –mayor densidad, niveles crecientes de nitrógeno, cultivares adaptados– pueden ser un camino a recorrer en fechas de siembra diferidas.

Palabras clave: Maíz, genética, siembra tardía, rendimiento alcanzable, nitrógeno, interacciones, manejo adaptativo.

Introducción

El presente experimento aborda un aspecto relevante del manejo agronómico del maíz, como es la interacción entre genética, densidad, y fertilización nitrogenada. La fecha de siembra tardía representa un ambiente diferente respecto de las tempranas. Respecto de la densidad, el tamaño de las plantas es mayor, pero en un ambiente con mejor disponibilidad de recursos. El primer aspecto sugiere bajar la densidad, y el segundo, reducirla.

Por el contrario, la oferta de nitrógeno desde el suelo en siembra tardía es superior respecto de la fecha temprana, por la prolongación del barbecho, las mayores temperaturas y mejor sincronía entre oferta del ambiente y demanda del cultivo. El interrogante sobre mantener el ajuste de nitrógeno calibrado en siembras tempranas, a igual nivel de rendimiento, permanece vigente. Una complejidad adicional surge al comprender que la genética no presenta una respuesta aditiva y uniforme a densidad y fertilización, sino que interactúa con ellos de diferentes maneras. La respuesta adaptativa de cada cultivar cambia con la fecha de siembra, debiendo calibrar umbrales para ajustar recomendaciones.

El objetivo de este trabajo de investigación es analizar la interacción triple entre genética, densidad y nivel de nitrógeno en siembra tardía. Hipotetizamos que: 1. Diferentes genotipos presentan una respuesta particular a fertilización y densidad, y optimizan su productividad a una

combinación particular de dichos factores, y 2. La siembra tardía representa un cambio sustancial de ambiente y oferta de recursos, y por lo tanto los niveles óptimos pueden diferir respecto de los habitualmente manejados en fecha de siembra temprana.

Materiales y métodos

Durante la campaña 2021/22, se realizó un experimento de campo en la EEA INTA, sobre un suelo Serie Pergamino, Argiudol típico, (USDA-Soil Taxonomy V. 2006), capacidad de uso: I-2. Se sembró el día 09 de diciembre en forma mecánica, logrando las densidades objetivo por raleo. Fue espaciado a 0,7 m entre hileras. Las unidades experimentales fueron de 21 m², y la superficie cosechada 5 m². Se fertilizó con 100 kg/ha de MAP a la siembra y 100 kg/ha de sulfato de calcio en cobertura total, también durante la siembra. El diseño correspondió a bloques completos aleatorizados con 2 repeticiones, con arreglo factorial completo de los tratamientos. Se estudió la interacción entre los factores genotipo, densidad y fertilización nitrogenada. Los niveles de estos factores se presentan en la Tabla 1. El objetivo de N se logró mediante la aplicación de urea granulada en post-emergencia temprana, considerando también el aportado por MAP en línea y el disponible en forma de N-nitratos en suelo, a 60 cm de profundidad.

Tabla 1: Factores y niveles evaluados en el experimento. Fecha de siembra tardía. Campaña 2021/22.

Factor 1: Genotipo	Factor 2: Densidad	Factor 3: (N suelo + fertilizante)
Syngenta NK 979 Vip3 Syngenta NK 897 Vip3 Syngenta NK 890 Vip3	60000 pl/ha 75000 pl/ha 90000 pl/ha	140 kgN/ha 180 kgN/ha 240 kgN/ha

Tabla 2: Análisis de suelo efectuado al momento de la siembra (0-20 cm).

Materia Orgánica	N total	Fósforo extractable	pH	N-Nitratos suelo 0-60 (diciembre)	S-Sulfatos suelo	Agua útil en suelo (mm)
%	%	mg/kg	agua 1:2,5	kg/ha	mg/kg	150 cm - siembra
2,47	0,124	16,2	5,6	84,5	10,7	204 mm
muy bajo	muy bajo	medio	ácido	alto	alto	alto
Potasio	Calcio	Magnesio	Zinc	Boro	Mn	Hierro
mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
461	1573	252	0,49	0,64	36,5	59,2
muy alto	muy alto	muy alto	muy bajo	bajo	muy alto	muy alto

La cosecha se realizó en forma manual, el día 04 de junio, con trilla estacionaria de las muestras. Para el estudio de los resultados se realizaron análisis de la varianza, comparaciones de medias y análisis de regresión.

Resultados y discusión

A pesar de atravesar una primavera seca, el nivel de almacenaje fue creciendo hasta diciembre

(inicial 204 mm, Tabla 2). Durante la etapa vegetativa el cultivo estuvo sometido a precipitaciones escasas y altas temperaturas, pero se registró una mejora notable hacia floración. El cambio aconteció a mediados de enero, de allí en adelante las buenas condiciones se mantendrían (Figura 1), determinando un ambiente contrastante al de la siembra temprana.

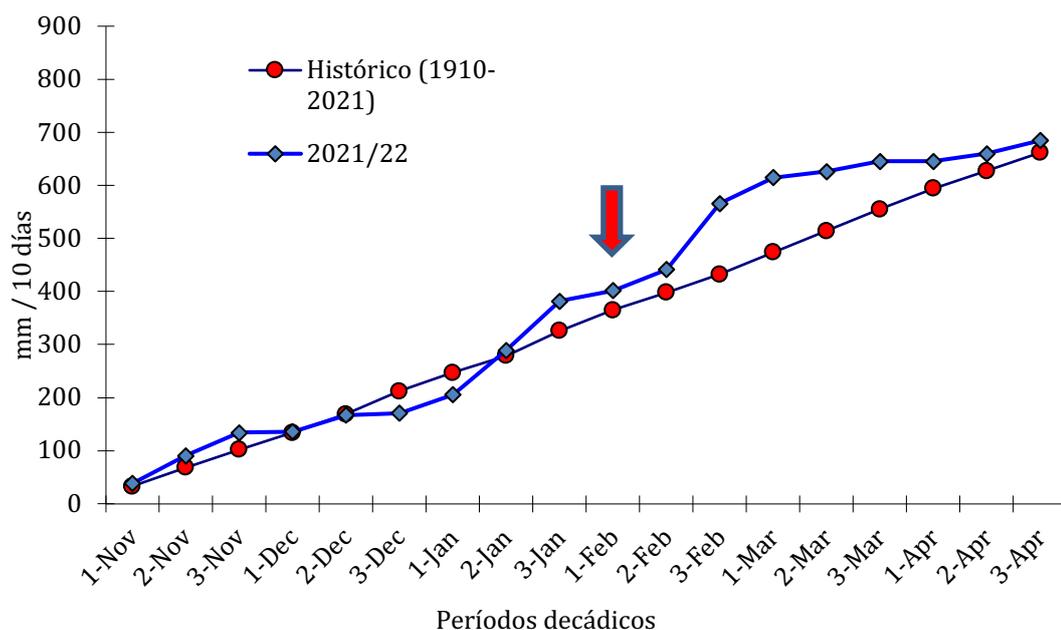


Figura 1. Precipitaciones decádicas acumuladas del ciclo 2021-22, y su comparación con la media histórica. Maíz de siembra tardía, localidad de Pergamino. La flecha indica la ocurrencia de floración femenina. Agua útil inicial (150 cm) 204 mm. Precipitaciones totales durante el ciclo de cultivo 684,6 mm.

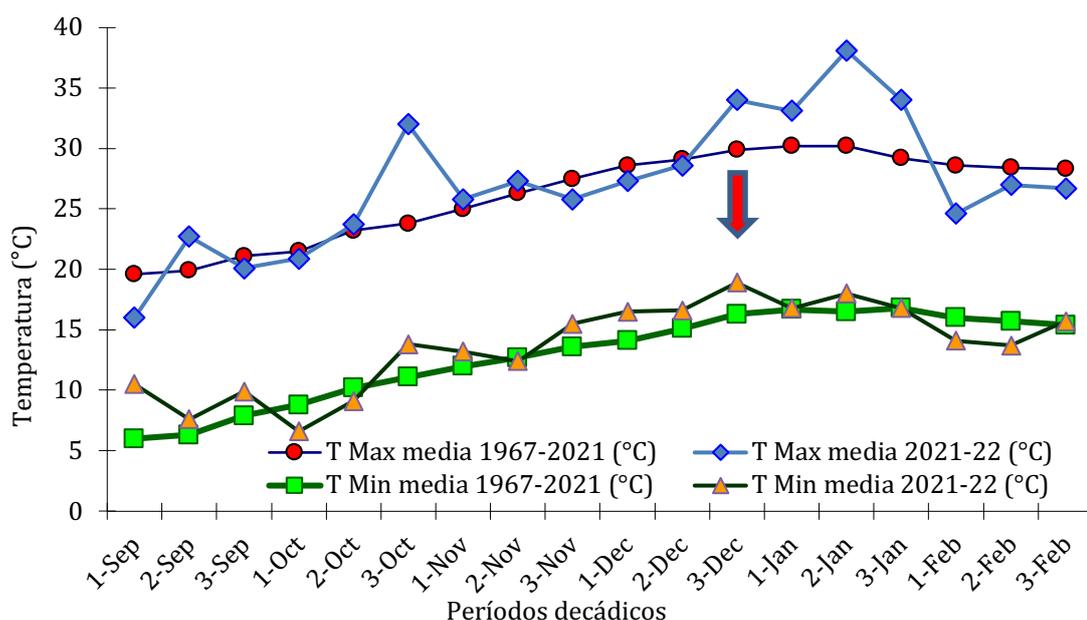


Figura 2: Temperaturas decádicas del ciclo 2021/22, comparadas al valor histórico 1967-2021. La temperatura máxima media durante el ciclo de cultivo fue superior a la histórica en 0,7 °C, y la mínima media en 0,9 °C. Agrometeorología EEA INTA Pergamino.

En la Tabla 3 se presentan los promedios de los efectos simples y su significancia estadística,

mientras que en la Figura 2 se ilustran los rendimientos por tratamiento.

Tabla 3: Comparación de medias (LSD $\alpha=0,05$) para los efectos simples de híbrido, densidad y nitrógeno. Fecha de siembra tardía. Pergamino, campaña 2021/22

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=1023,32593					
Error: 2230607,1937 gl: 26					
Cultivar	Medias	n	E.E.		
NK 897	14051,39	18	352,03	A	
NK 979	12869,44	18	352,03		B
NK 890	12669,44	18	352,03		B
Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)					
Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=1023,32593					
Error: 2230607,1937 gl: 26					
Densidad	Medias	n	E.E.		
90000	13951,39	18	352,03	A	
75000	13243,06	18	352,03	A	B
60000	12395,83	18	352,03		B
Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)					
Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=1023,32593					
Error: 2230607,1937 gl: 26					
Nitrógeno	Medias	n	E.E.		
220	13937,5	18	352,03	A	
180	13361,1	18	352,03	A	
140	12291,6	18	352,03		B
Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)					

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

La fecha de **siembra tardía** arrojó un rendimiento promedio de 13197 kg ha⁻¹, resultando muy superior a los de un experimento similar conducido en fecha temprana. Un mejor almacenaje inicial y el retorno de las precipitaciones resultaron claves para este comportamiento. El retraso en la fecha de siembra podría reducir el rendimiento potencial pero no el alcanzable a campo, para la latitud de Pergamino (Amas et al., 2022). La adaptabilidad de las siembras tardías fue mencionada por Ferraris (2022). Se determinaron diferencias significativas por efecto de Cultivar ($P=0,0210$), Densidad ($P=0,0157$) y N ($P=0,0093$), así como la interacción Cultivar x Densidad ($P=0,010$). El resto de las interacciones no fueron significativas ($P>0,10$).

La interacción cultivar x densidad fue la más importante, alcanzando un nivel estadístico significativo. La densidad óptima fue diferente según el genotipo. Para NK 979 Vip 3 el óptimo fue 75 mil pl ha⁻¹ (Figura 3). En NK 897 Vip 3 el mayor rendimiento se encontró en 60 mil pl ha⁻¹, a excepción de la fertilización con N220. Por el contrario, en NK 890 Vip 3 se logró lo propio en 90 mil pl ha⁻¹ (Figura 3). El ajuste diferencial entre genotipos a la densidad es mencionado por Rotili et al., 2022.

La respuesta a la fertilización fue, en promedio, similar en todos los cultivares, pero incrementó fuertemente con la densidad. Las combinaciones de mayor rendimiento fueron de

Entre los cultivares, Syngenta NK 897 Vip3 fue el de mayor rendimiento ($P<0,05$), superando a NK 979 Vip3 y NK 890 Vip3 (Tabla 3). La diferente jerarquía entre cultivares según fecha de siembra resulta muy importante a la hora de realizar una planificación futura.

Respecto de la densidad, la mejora del ambiente permitió tolerar y expresar el potencial genético en la densidad máxima de 90 mil pl ha⁻¹, la cual superó a 60 mil, encontrando en 75 mil pl ha⁻¹ un comportamiento medio (Tabla 3 y Figura 3). Por último, el incremento de la fertilización de N140 (suelo + fertilizante) a N180 determinó un salto significativo en la productividad. De N180 a N220 el aumento fue moderado, no significativo y, en la relación de precios niveles de precio de Julio 2022 (4 kg maíz / kg urea), no económica. NK 897 Vip 3 con 90 mil pl ha⁻¹ y N220, y NK 890 Vip 3 con 90 mil pl ha⁻¹ y N220 con 16238 kg ha⁻¹. Por el contrario, el mínimo se obtuvo con NK 890 Vip 3 en 60 mil pl ha⁻¹ y N140 con 8375 kg ha⁻¹ (Figura 3). La variabilidad en el óptimo de N según cultivar y densidad es mencionada por Cohelo et al., (2022), en ambientes de buena disponibilidad hídrica de Brasil.

El trabajo permite valorar la siembra tardía como herramienta para estabilizar los rendimientos en un ciclo con distribución de precipitaciones propia del ciclo La Niña, el potencial de la correcta fertilización para sostener la demanda de crecimiento del cultivo, y

la necesidad de ajustar genotipo y densidad de acuerdo al ambiente.

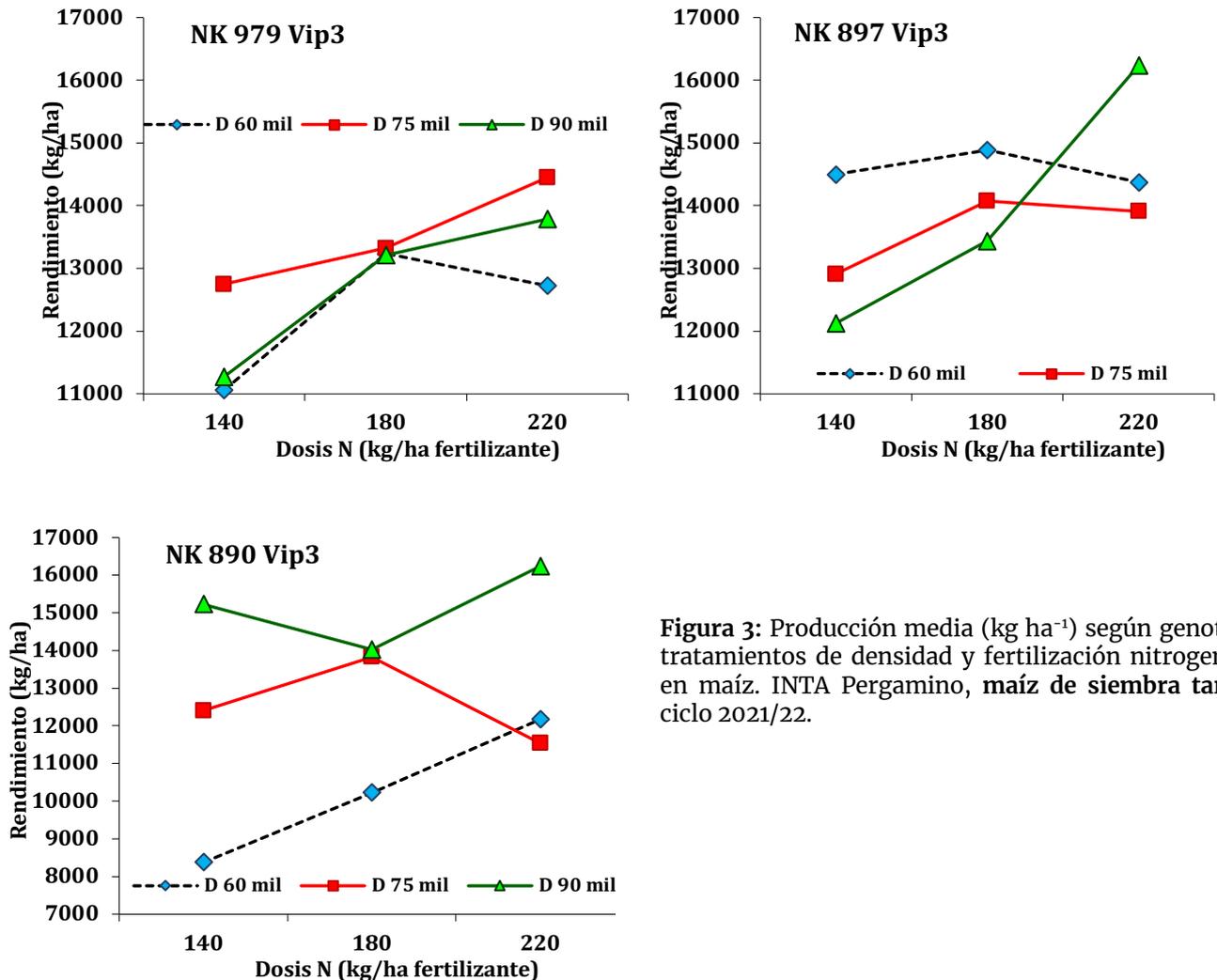


Figura 3: Producción media (kg ha⁻¹) según genotipo, tratamientos de densidad y fertilización nitrogenada en maíz. INTA Pergamino, maíz de siembra tardía, ciclo 2021/22.

Los resultados obtenidos permiten aceptar las hipótesis propuestas. En siembra tardía el manejo de densidad y fertilización permitió maximizar la expresión de los genotipos. Los óptimos se determinaron en niveles superiores a una siembra temprana bajo estrés. Los resultados corresponden a una campaña, en un ambiente de alto rendimiento, y se deberán validar antes de realizar recomendaciones más generales para toda la región.

Bibliografía

Amas, J. I., Fernández, J. A., Curin, F., Cirilo, A. G., Ciampitti, I. A., & Otegui, M. E. (2022). Maize

genetic progress in the central Pampas of Argentina: effects of contrasting sowing dates. *Field Crops Research*, 281, 108492.

Coelho, A. E., Sangoi, L., Balbinot Junior, A. A., Kuneski, H. F., & Martins Júnior, M. C. (2022). Nitrogen use efficiency and grain yield of corn hybrids as affected by nitrogen rates and sowing dates in subtropical environment. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 46.

Ferraris, G. 2022. Ambientación y nutrición de maíz tardío. *Actas Congreso de Maíz tardío, CMT 2022*. Buenos Aires, Argentina.

Rotili, D. H., Abeledo, L. G., Larrea, S. M., & Maddonni, G. Á. (2022). Grain yield and kernel setting of multiple-shoot and/or multiple-ear maize hybrids. *Field Crops Research*, 279, 108471.

Estrategias de manejo de nitrógeno para reducir las pérdidas por volatilización en maíz bajo condiciones de riego y seco

Iglesias, P.^{1*}, N. Wyngaard^{1,2}, H. Sainz Rozas^{1,2,3}, N. Lewczuck³, W. Carciochi^{1,2}, M. Toribio⁴, S. Tovar¹, F. García¹, N. Reussi Calvo^{1,2}

¹Facultad de Ciencias Agrarias, UNMdP. ²CONICET. ³EAA INTA Balcarce. ⁴Profertil S.A.

*Contacto: pauliiglesias11@gmail.com

Introducción

En la Región Pampeana se ha determinado una brecha de rendimiento (rendimiento promedio del productor respecto al potencial en seco) para maíz (*Zea mays* L.) del 40%, siendo la fertilización nitrogenada una práctica que permitiría reducirla (Aramburu Merlos *et al.*, 2015). Sin embargo, la recuperación del nitrógeno (N) del fertilizante por parte de los cultivos durante la estación de crecimiento no supera el 50% (Herrera *et al.*, 2016). La baja recuperación del N del fertilizante se debe en parte a procesos de pérdidas gaseosas de N, dentro de los que se destaca la volatilización de amoníaco (NH₃), que resultan en una disminución de la eficiencia de uso del N (EUN) en maíz (Sainz Rozas *et al.*, 2004; Bonelli *et al.*, 2017). Por lo tanto, surge la necesidad de aplicar las mejores prácticas de manejo de la fertilización, como la selección de la fuente y momento correctos con el objetivo de aumentar la productividad y reducir el impacto ambiental.

La utilización de inhibidores de la actividad ureásica y de la nitrificación se ha propuesto como una alternativa para mejorar la sincronización entre el momento de mayor oferta y demanda de N, aumentando el rendimiento (Drury *et al.*, 2017), la EUN y limitando la emisión de gases (Wang *et al.*, 2020). Según Abalos *et al.* (2014), la eficiencia de los inhibidores de la actividad ureásica y de la nitrificación es afectada por factores del suelo (ej. textura, pH), de manejo (ej. dosis, riego, método de fertilización) y del cultivo. Además, estos autores, demostraron una mayor respuesta en el rendimiento en grano con el empleo de estos inhibidores en condiciones de riego respecto a seco, sin diferencias en la EUN. Por otra parte, Liu *et al.* (2019) reportaron que la aplicación de urea con inhibidor de la actividad ureásica redujo las pérdidas por volatilización e incrementó el rendimiento en grano y la EUN.

En cuanto al momento de fertilización, los híbridos modernos de maíz absorben durante la etapa post-floración hasta un 40% del total del N requerido a madurez fisiológica (R₆, Ritchie y

Hanway, 1982), lo cual amplía la ventana de aplicación de dicho nutriente en ambientes sin restricciones hídricas (Fernández *et al.*, 2020). Por lo tanto, es de interés conocer si la aplicación fraccionada de N, aún en estados avanzados del cultivo, combinado con diferentes fuentes de N reduciría las pérdidas gaseosas por volatilización. No obstante, no existen trabajos en la Región Pampeana que evalúan de manera integrada el efecto de la fuente y fraccionamiento de N sobre pérdidas por volatilización de NH₃ y su impacto en rendimiento y EUN.

Los objetivos de este trabajo fueron evaluar el efecto del fraccionamiento de la dosis combinado con diferentes fuentes de N [Urea, Urea-Limus (inhibidor de la actividad ureásica) y Urea-DMPP (inhibidor de la nitrificación)] bajo condiciones de riego y seco sobre: a) las pérdidas de N por volatilización, b) el rendimiento en grano y c) la EUN.

Materiales y métodos

En la campaña 2022/2023 se realizaron dos ensayos bajo siembra directa en la localidad de Balcarce, uno en condiciones de seco y otro bajo riego. El híbrido de maíz empleado fue Pioneer 1815 y la fecha de siembra fue el 24 de octubre. El diseño experimental fue en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones. En ambos experimentos se evaluó un testigo (0 kg N ha⁻¹), una dosis de 200 kg N ha⁻¹ aplicada en el estado de cuatro hojas desarrolladas (V₄) y la misma dosis de N fraccionada entre V₄ y floración (R₁) (120 y 80 kg N ha⁻¹, respectivamente); combinadas con cuatro fuentes de N [Urea, Urea-Limus y Urea-DMPP (46-0-0)]. Se trabajó sin limitaciones de fósforo (P) y azufre (S) para lo cual se aplicó a la siembra 20 kg P ha⁻¹ y 20 kg S ha⁻¹, respectivamente. A la siembra del cultivo se realizó un muestreo de suelo en superficie (0-20 cm) para determinar pH (Thomas y Hargrove, 1984), materia orgánica (MO) (Walkley y Black, 1934), nitrógeno mineralizado en incubación anaeróbica (Nan) (Keeney y Nelson, 1983), P-Bray (Bray y Kurtz, 1945) y zinc (Lindsay y

Norvell, 1978); y en el perfil (0-20, 20-40 y 40-60 cm) para N-nitrato (N-NO₃⁻) (Keeney y Nelson, 1983) (Tabla 1).

Tabla 1. Variables edáficas del sitio experimental. MO: materia orgánica, Nan: nitrógeno mineralizado en incubación anaeróbica, Zn: zinc.

Sitio	pH	MO (%)	Nan (ppm)	P-Bray (ppm)	Zn-DTPA (ppm)	N-NO ₃ ⁻ (kg ha ⁻¹)	
						0-20 cm	0-60 cm
Secano	5,6	4,3	40,1	71	1,2	92,3	
Riego	5,5	4,5	40,4	62	1,6	101,3	

La determinación de la volatilización de N-NH₃ se realizó diariamente utilizando un sistema estático semiabierto. El mismo consiste en dos cilindros (30 cm de diámetro, 50 cm de altura) por unidad experimental con dos esponjas de poliuretano separadas a 12 cm y saturadas con ácido sulfúrico 0,5 M (H₂SO₄). La esponja inferior se colocó a 30 cm por encima de la superficie del suelo para capturar el N-NH₃ volatilizado, y la segunda esponja, a 4 cm por debajo de la parte superior del cilindro para evitar que el N-NH₃ de la atmósfera ingrese a la cámara. Las esponjas se cambiaron cada 24 h y se lavaron con 1,5 L de agua desionizada. Se alcalinizó una alícuota de 25 ml con hidróxido de sodio al 40% (NaOH) y se determinó el N-NH₃ por microdestilación. Las mediciones se iniciaron en el momento de la aplicación del fertilizante, luego de V₄ en todos los tratamientos y luego de R₁ en los tratamientos testigo y de dosis fraccionada. Dichas mediciones se continuaron hasta que las pérdidas de los tratamientos fertilizados fueron insignificantes e igualaron al testigo, o se registró una lluvia mayor a 10 mm. A partir de la suma de los valores obtenidos de emisiones de N-NH₃ diarias, se calculó la volatilización de N-NH₃ acumulada. Adicionalmente, se calculó la volatilización acumulada neta (N-NH₃-neta-acum, proveniente del fertilizante) como la diferencia entre la volatilización acumulada del tratamiento fertilizado y el testigo. La misma se expresó en porcentaje en función de la dosis aplicada en cada estadio.

A madurez fisiológica (R₆), se determinó el rendimiento del cultivo en cada unidad experimental mediante la cosecha manual de espigas sobre los dos surcos centrales (6 m) y se midió el contenido de humedad en grano. El rendimiento se expresó al 14,5% de humedad. Por último, se calculó la EUN como el cociente entre la diferencia del rendimiento del tratamiento fertilizado con N y el testigo (0 N), y el N aplicado.

Se evaluó el efecto del fraccionamiento combinado con diferentes fuentes de N mediante

el Análisis de Varianza empleando el software estadístico INFOSTAT (Di Rienzo et al., 2008). Cuando las diferencias entre tratamientos fueron significativas se empleó el Test Tukey ($\alpha=0,05$).

Resultados y discusión

Caracterización edafoclimática

Los valores de MO, Nan y N-NO₃⁻ a la siembra de los cultivos variaron entre 4,3 y 4,5 %; 40,1 y 40,4 mg kg⁻¹ y 92,3 a 101,3 kg ha⁻¹ en condiciones de secano y riego, respectivamente (Tabla 1). Si bien los valores de N-nitrato inicial son medios-altos respecto a los promedios zonales, el bajo Nan indicaría sitios con alta probabilidad de presentar respuesta al agregado de N. Valores similares han sido reportados para la Región Pampeana por Sainz Rozas et al. (2011) y Orcellet et al. (2017).

Las precipitaciones registradas durante el ciclo de crecimiento del cultivo fueron de 564 mm, siendo el requerimiento hídrico promedio de maíz en Balcarce entre 600 y 700 mm. Para la condición de secano, se registró un déficit hídrico de 147 mm durante el periodo crítico del cultivo. Por su parte, en la condición de riego, las precipitaciones sumadas a los 277 mm regados generaron una adecuada disponibilidad hídrica durante gran parte del ciclo, alcanzando un total de 841 mm.

Pérdidas por volatilización

Las pérdidas netas por volatilización representaron entre el 0,6 y 25 % de la dosis aplicada según tratamiento (Figura 1). No se observaron diferencias significativas en las pérdidas de N-NH₃ entre riego y secano, lo cual sugiere que las lluvias registradas en los días previos a la aplicación no limitaron la hidrólisis de la urea (datos no mostrados). No obstante, para ambas condiciones hídricas se determinó interacción significativa entre la fuente y el fraccionamiento. El uso de inhibidores de la actividad ureásica y de la nitrificación redujeron

las pérdidas, respecto a la urea sin inhibidor, en un 11,8 y 3,5% para la aplicación fraccionada de N y en un 17 y 1,4% para la aplicación completa en V_4 , respectivamente (Figura 1). No obstante, no se detectaron diferencias significativas en las pérdidas por volatilización entre Urea y Urea-DMPP para la aplicación completa de N en V_4 en secano. Por lo tanto, el uso principalmente de inhibidores de la actividad ureásica redujeron las pérdidas de $N-NH_3$ al igual que lo reportado por Drury *et al.* (2017), Liu *et al.* (2019) y Wang *et al.* (2020).

A su vez, se determinó un efecto positivo del fraccionamiento de N sobre la reducción de las pérdidas de $N-NH_3$, tanto en riego como en secano y para todas las fuentes. La disminución

promedio de riego y secano fue del 7,3, 9,5 y 2,3% para Urea, Urea-DMPP y Urea-Limus, respectivamente. Esto indicaría que demorar la corrección de N hasta estados avanzados del cultivo no incrementa las pérdidas por volatilización, lo cual favorece el monitoreo y la intervención durante el ciclo del cultivo. Cabe destacar que la dosis de N aplicada en R_1 supera en un 15-20% a las medias empleadas en maíz en la región pampeana, no obstante, las pérdidas en dicho estadio fueron menores al 7% del N aplicado. Esto se debe a que las pérdidas se incrementan con las dosis por un mayor aumento en la concentración de amonio y del pH alrededor del gránulo del fertilizante (Echeverría y Sainz Rozas, 2015).

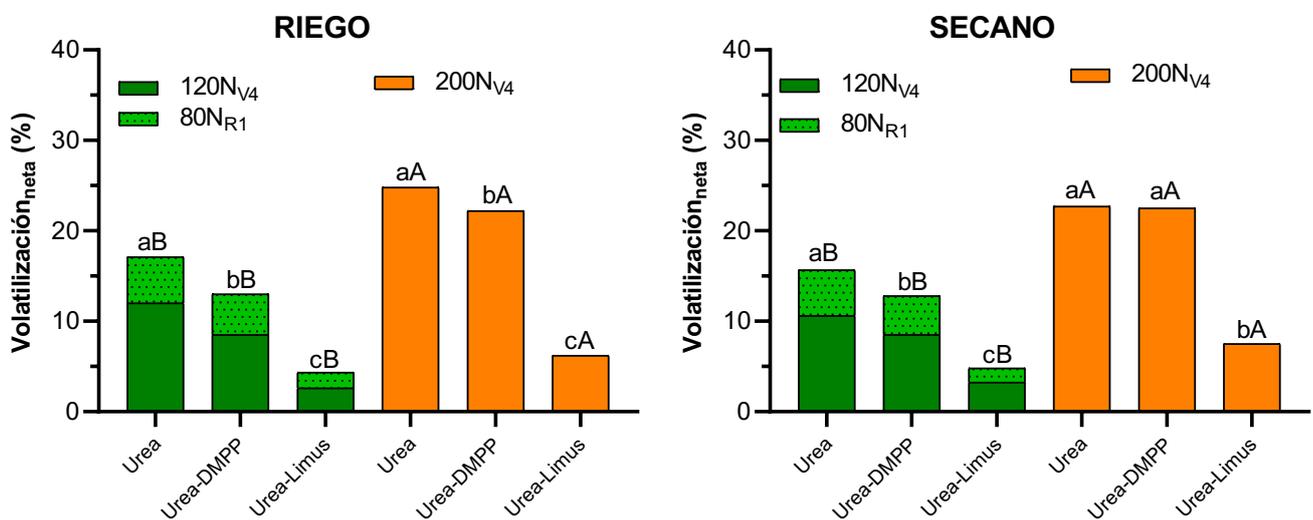


Figura 1. Volatilización neta acumulada (%) para diferentes estrategias de fertilización (aplicación en V_4 vs V_4+R_1) y fuentes de N (Urea, Urea-DMPP y Urea-Limus) en riego y secano. Para una determinada condición hídrica, letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas entre fuentes, mientras que letras mayúsculas diferentes indican diferencias entre estrategias de fertilización.

Rendimiento y eficiencia de uso del nitrógeno

El rendimiento para la condición de riego varió desde 14953 hasta 19717 kg ha⁻¹, mientras que en secano desde 7230 hasta 13327 kg ha⁻¹, según tratamiento (Figura 2). No se detectaron diferencias significativas en rendimiento por efecto de la fuente y fraccionamiento, independientemente de la condición hídrica. La respuesta promedio al agregado de N fue de 2299 y 2475 kg ha⁻¹ en riego y secano, respectivamente. Varios autores han determinado un efecto positivo de la fuente sobre el rendimiento (Abalos

et al., 2014; Drury *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2019). No obstante, para el sudeste bonaerense, Bonelli *et al.* (2017) no han observado efecto de la fuente o momento de aplicación de N al igual que los resultados obtenidos en este trabajo. Esto indica que la utilización de urea con o sin inhibidor (actividad ureásica o nitrificación) combinado con la aplicación de N en estados avanzados del cultivo no implicaría penalidades en el rendimiento, independientemente de la condición hídrica.

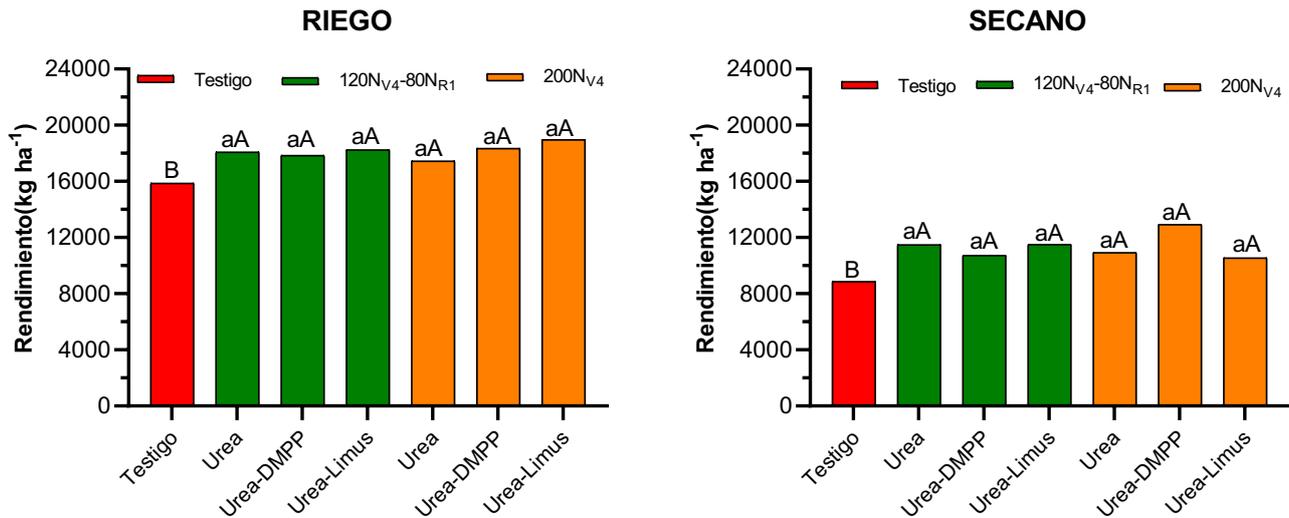


Figura 2. Rendimiento del cultivo de maíz para las diferentes estrategias de fertilización (aplicación en V_4 vs V_4+R_1) y fuentes de N (Urea, Urea-DMPP y Urea-Limus) en riego y secano. Para una determinada condición hídrica, letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas entre fuentes, mientras que letras mayúsculas diferentes indican diferencias entre estrategias de fertilización.

En cuanto a la EUN, no se observaron diferencias significativas por efecto de la condición hídrica, fuente o fraccionamiento de N. Cuando se aplicó el N de manera fraccionada, la EUN fue en promedio de 12,1, 9,6 y 12,6 kg grano kg N⁻¹ para Urea, Urea-DMPP y Urea-Limus, respectivamente. Por su parte, en la dosis completa de N, la EUN fue de 9,1, 16,4 y 11,8 kg grano kg N⁻¹ para Urea, Urea-DMPP y Urea-Limus. La ausencia de efecto de fuentes y fraccionamiento coincide con lo reportado por Abalos *et al.* (2014).

Conclusión

La aplicación de urea con inhibidores principalmente de la actividad ureásica y/o el fraccionamiento de la dosis de N disminuyen las pérdidas por volatilización bajo condiciones de riego y secano, sin ocasionar modificaciones en el rendimiento de maíz ni en la eficiencia de uso de N. Por consiguiente, la selección de la fuente y el fraccionamiento de la dosis de N serian estrategias promisorias de manejo de N con el objetivo de reducir las emisiones gaseosas sin afectar el rendimiento del cultivo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la empresa Profertil S.A por el financiamiento de la investigación, además de los proyectos PICT 2020- 0605 y AGR 704/23.

Bibliografía

- Abalos, D.; S. Jeffery; A. Sanz- Cobena; G. Guardia; A. Vallejo. 2014. Agriculture, Ecosystems & Environment. Volume 189:136-144. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.03.036>.
- Aramburu Merlos, F.; J. P. Monzon; J. L. Mercu; M. Taboada; P. Grassini. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. Fields Crops Research. 184:145-154. DOI: 10.1016/j.fcr.2015.10.001.
- Bonelli, L. E., Sainz Rozas, H., Echeverría, H. y Barbieri, P. (2017). Fuente y momento de aplicación de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en Balcarce. Ciencia del Suelo, 36 (1): 88-98.
- Bray, R. H., Kurtz, L. T. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. Soil science, 59(1), 39-46.
- Di Rienzo J.A.; Casanoves, F.; Balzarini, M.G.; Gonzalez, L.; Tablada, M.; Robledo, C.W. 2008. InfoStat, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Drury, C. F., Yang, X., Reynolds, W. D., Calder, W., Oloya, T. O., Woodley, A. L. 2017. Combining urease and nitrification inhibitors with incorporation reduces ammonia and nitrous oxide emissions and increases corn yields. Journal of Environmental Quality, 46(5), 939-949. DOI:10.2134/jeq2017.03.0106.
- Fernández, J.A., J. DeBruin, C.D. Messina, y I.A. Ciampitti. 2020. Late-season nitrogen

- fertilization on maize yield: A meta-analysis. *F. Crop. Res.* 247(February): 107586.
- Herrera, J. M., Rubio, G., Häner, L. L., Delgado, J. A., Lucho-Constantino, C. A., Islas-Valdez, S., Pellet, D. 2016. Emerging and established technologies to increase nitrogen use efficiency of cereals. *Agronomy*, 6(2), 25.
- Keeney, D. R., Nelson, D. W. 1983. Nitrogen—inorganic forms. *Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties*, 9, 643-698.
- Liu, S.; X. Wang; X. Yin; H. J. Savoy; A. McClure y M. E. Essington. 2019. Ammonia volatilization loss and corn nitrogen nutrition and productivity with efficiency enhanced UAN and urea under no-tillage. *Sci Rep* 9, 6610. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42912-5>.
- Lindsay, W.L., and W.A. Norvell. 1978. Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42:421-428. doi:10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x.
- Orcellet, J. M.; Reussi Calvo, N. I.; Sainz Rosas, H. E.; Wyngaard, N. y Echeverría, H. E. 2017. Anaerobically incubated nitrogen improved nitrogen diagnosis in corn, *Agronomy Journal*, 109:1-8. DOI:10.2134/agronj2016.02.0115.
- Ritchie, S.W. y J.J. Hanway. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service, Iowa, EEUU. Special Report N°48. pp. 24.
- Sainz Rozas, H., Echeverría, H. E. y Barbieri, P. A. 2004. Nitrogen Balance as Affected by Application Time and Nitrogen Fertilizer Rate in Irrigated No-Tillage Maize. *Agronomy Journal*, 96:1622-1631. DOI: 10.2134/agronj2004.1622
- Sainz Rosas, H.; H. E. Echeverría y H. P. Angelini. 2011. Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana argentina. *Ciencia del Suelo*. 29 (1): 29-37.
- Echeverría, H. E. y Sainz Rozas, H. R. (2015). Nitrógeno. En: Echeverría, HE & FO García (eds.) 2ª edición. *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. INTA, Buenos Aires, Argentina. pp. 189-228.
- Thomas, G. W., Hargrove, W. L. 1984. The chemistry of soil acidity. *Soil acidity and liming*, 12, 3-56.
- Walkley, A., Black, I. A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38.
- Wang, H., Köbke, S., Dittert, K. 2020. Use of urease and nitrification inhibitors to reduce gaseous nitrogen emissions from fertilizers containing ammonium nitrate and urea. *Global Ecology and Conservation*, 22, e00933. DOI: 10.1016/j.gecco.2020.e00933

¿Impacta el momento de la fertilización nitrogenada sobre el peso final de los granos de maíz?

Michelin, C. I.^{1,2}, Novelli, L.E.^{1,2,3}, Maltese, N.E.^{1,2,3}, Caviglia, O.P.^{1,2}

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) – ²Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA – UNER) – ³Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

Contacto: cintia.michelin@uner.edu.ar

Introducción

El cultivo de maíz (*Zea mays L.*) es altamente dependiente de la disponibilidad de nitrógeno (N) para alcanzar los rendimientos potenciales del ambiente en que se lo cultiva. Entre Ríos ha incrementado año a año la superficie cultivada con este cereal, debido a la gran demanda de granos por parte de las actividades pecuarias de la provincia, la cual aún no se logra cubrir. Esto se debe en parte, a que los ambientes predominantes son de mediana a baja productividad (<6000 kg ha⁻¹), caracterizados por presentar suelos con elevado contenido de arcillas expansivas, alto grado de erosión, elevada variabilidad en la distribución de lluvias combinado con fertilización deficiente y escaso o nulo control de enfermedades foliares, que no permiten obtener altos rendimientos cuando las condiciones ambientales se tornan favorables.

Al mismo tiempo, la superficie de maíz en Entre Ríos se concentra principalmente en fechas de siembra tempranas (mediados de septiembre), donde la provisión de N vía mineralización es menor a la esperada respecto a siembras tardías (mediados de diciembre). Por lo tanto, el aporte vía fertilizante resulta aún más importante. Sin embargo, las dosis utilizadas suelen ser menores a las requeridas por el cultivo y, además, las mismas se suelen aplicar al momento de la siembra o en estadios tempranos del cultivo. Esto podría conducir a una asincronía entre la oferta y demanda de N, principalmente en híbridos modernos que absorben durante el periodo de llenado de granos entre un 40% y 50% del total del N requerido a madurez fisiológica.

Por otra parte, se conoce que el rendimiento del maíz está determinado por el número de granos por unidad de área y el peso individual de los mismos. Si bien el número de granos es la variable más sensible a los cambios de ambiente y manejo, y a su vez el componente que mejor explica las variaciones en rendimiento, en algunos genotipos, se ha observado una importante variabilidad en el rendimiento para un nivel de número de granos dado. Por lo tanto, sería esperable que, en ambientes de baja

productividad como los de Entre Ríos con predominancia de manejos defensivos, el componente de peso de granos presente mayor relevancia.

El peso potencial del grano se define en la fase lag, donde hay una gran división celular, dando origen a las células del endosperma que almacenarán las reservas del grano maduro. Se conoce que la densidad de plantas, el genotipo y la disponibilidad de N determinan en gran medida la capacidad de alcanzar un peso de grano potencial. Sin embargo, existe escasa información acerca del impacto del momento de la fertilización nitrogenada sobre este componente, principalmente en aquellos genotipos con mayor peso potencial de los mismos.

El objetivo de este trabajo fue analizar el impacto de diferentes momentos de aplicación de fertilizante nitrogenado sobre el peso de los granos en dos híbridos contrastantes y dos densidades de plantas.

Materiales y métodos

En el ciclo agrícola 2022/2023 se llevó a cabo un experimento en la localidad de Sauce Pinto, Entre Ríos (31°50'30"S; 60°24'35"O) sobre un suelo Vertisol (Peluderte argiudólico). Se utilizó un DBCA con tres repeticiones, donde se analizó el efecto de tres factores: i) dos híbridos (H), caracterizados *a priori* como contrastantes en su peso final de grano (con mayor y menor peso BRV 8380 PWUE y BRV 8472 PWUN, respectivamente), ii) dos densidades de plantas (DP) (3 y 6 pl m⁻²) y iii) tres momentos de fertilización (MF) con 100 kg N ha⁻¹ [siembra (S), V₁₀ y R₁]. Para no comprometer el crecimiento inicial del cultivo, todos los tratamientos fueron fertilizados con una dosis de arranque de 20 kg N ha⁻¹ al momento de la siembra, completando la dosis objetivo en el momento de fertilización correspondiente. La aplicación se realizó al voleo en cobertura, utilizando como fuente nitrato de amonio calcáreo (27-0-0, CAN).

Para evaluar la dinámica del peso de grano, previo a la floración, se seleccionaron y marcaron

20 plantas por parcelas y se taparon sus espigas, las cuales fueron liberadas en el mismo momento para asegurar que la polinización ocurriera el mismo día. A partir de R_1+7 días se cosecharon 20 granos del tercio medio en 3 espigas por parcela (60 granos totales) que fueron pesados inmediatamente para obtener su peso fresco y luego se secaron en estufa con circulación de aire forzado a 60°C hasta peso constante. Las fechas de evaluación fueron R_1+7 , R_1+14 , R_1+21 , R_1+35 , R_1+49 y R_1+63 días.

El contenido de agua en cada momento de muestreo se obtuvo de la diferencia entre peso fresco y peso seco y, el porcentaje de humedad, del cociente entre el contenido de agua y el peso fresco. A partir de una función fijada entre estas dos variables se estimó el contenido máximo de agua (al 55% de humedad del grano) (Ec. 1).

$$\text{Contenido máximo de agua (mg agua grano}^{-1}\text{)} = a + b\%H + c\%H^2 + d\%H^3 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde a es la intercepción con el eje y , mientras b , c y d son parámetros del modelo.

Para el peso de granos se ajustó un modelo lineal-plateau definido por las ecuaciones 2 y 3.

$$\text{Peso de grano (mg grano}^{-1}\text{)} = a + bX \quad \text{si } X < C \quad (\text{Ec. 2})$$

$$\text{Peso de grano (mg grano}^{-1}\text{)} = P \quad \text{si } X > C \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde a es la ordenada al origen, b es la pendiente del modelo y la tasa de llenado efectiva, X son los días desde R_1 , C es el día desde R_1 donde ocurre la intercepción entre la fase de respuesta lineal y el plateau (valor crítico) y P es el peso de grano final.

A partir de esta función se obtuvo el fin del periodo de llenado efectivo que corresponde al

valor C y se calculó el inicio del periodo de llenado efectivo que corresponde al valor de X al cual la función se hace 0. La duración efectiva del llenado de granos se calculó como la diferencia entre el día de finalización e inicio de llenado efectivo.

La base de datos fue analizada mediante un análisis de varianza para las variables de interés y las medias entre los tratamientos se analizaron a través de un test de LSD Fisher ($p < 0,05$). Todos los análisis estadísticos se realizaron a través del software estadístico InfoStat.

Resultados y discusión

Durante el ciclo del cultivo, las precipitaciones fueron escasas y alejadas de los momentos en que se realizaron las fertilizaciones. El contenido de agua estuvo muy por debajo de la capacidad de campo y a partir de octubre fue menor al 50% del agua útil. Asimismo, se registraron días consecutivos con temperaturas máximas por encima de los $33-35^\circ\text{C}$ (Fig. 1).

Al analizar la interacción triple $H \times DP \times MF$ para las variables peso final de granos, tasa de llenado efectiva, duración efectiva de llenado y contenido máximo de agua, no se encontró efecto significativo ($p > 0,05$) (Tabla 1). El peso final tuvo efecto significativo del híbrido, alcanzando BRV 8380 PWUE un valor 10% superior a BRV 8472 PWUN ($p < 0,01$) (Tabla 1). También hubo efecto de la DP, donde 3 pl m^{-2} mostró un peso final de grano 17% superior a 6 pl m^{-2} ($p < 0,0005$). Sin embargo, no hubo efecto del momento de fertilización ($p > 0,05$).

La tasa de llenado efectiva de grano fue un 14% mayor con 3 pl m^{-2} respecto a 6 pl m^{-2} ($p < 0,001$) (Tabla 1).

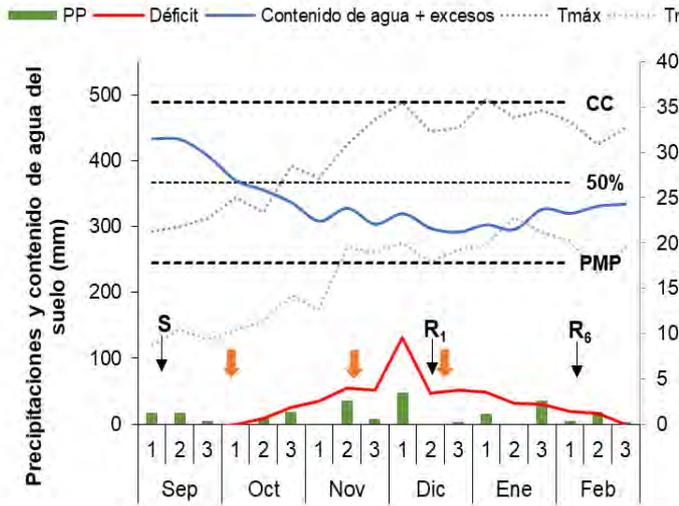


Figura 1: Variables climáticas para el ciclo del cultivo de maíz: precipitaciones (PP), déficit, contenido de agua + excesos, temperatura máxima (T máx) y mínima (T mín). Líneas punteadas indican capacidad de campo (CC), el 50% del agua útil (50%) y el punto de marchitez permanente (PMP). Las flechas naranjas muestran los momentos en que se realizó cada aplicación (S, V₁₀ y R₁) y las flechas negras distintos momentos del ciclo del cultivo (S, R₁ y R₆). Adaptado de Maltese, N. E.

En cuanto a la duración efectiva de llenado de granos, se registró interacción significativa de H x MF ($p < 0,05$) (Tabla 1). El híbrido BRV 8380 PWUE tuvo 7,5 días más de duración efectiva de llenado que BRV 8472 PWUN solo en la aplicación de N en V₁₀, mientras que en las aplicaciones de N en S y R₁ no se encontraron diferencias entre los genotipos evaluados (Fig. 2).

El contenido máximo de agua también mostró efecto significativo para híbrido y densidad (Tabla 1). Por un lado, BRV 8380 PWUE alcanzó valores un 8% superior a BRV 8472 PWUN ($p < 0,01$) y por otro lado la DP de 3 pl m⁻² fue un 18% mayor que la de 6 pl m⁻² ($p < 0,0001$).

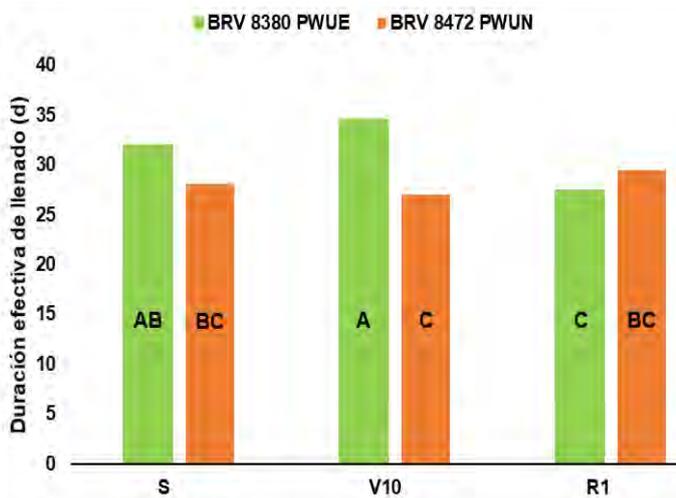


Figura 2: Duración efectiva de llenado de granos para los híbridos BRV 8380 PWUE (verde) y BRV 8472 PWUN (naranja) según el momento de fertilización (S, V₁₀ y R₁).

Tabla 1: Peso final, tasa de llenado efectiva, duración efectiva de llenado y contenido máximo de agua del grano para dos híbridos (BRV 8472 PWUN y BRV 8380 PWUE) en dos densidades de plantas (3 y 6 pl m⁻²) y tres momentos de fertilización (S, V₁₀ y R₁).

H	DP (pl m ⁻²)	MF	Peso final (mg grano ⁻¹)	Tasa de llenado efectiva de grano (mg d ⁻¹)	Duración efectiva de llenado de grano (d)	Contenido máximo de agua (mg agua grano ⁻¹)
BRV 8472 PWUN	3	S	122,4	4,5	27,1	136,0
		V ₁₀	129,3	4,7	27,4	128,3
		R ₁	140,3	4,5	31,2	127,9
	6	S	110,9	3,8	29,1	111,1
		V ₁₀	107,2	4,0	26,7	111,3
		R ₁	107,8	3,9	27,8	108,5
BRV 8380 PWUE	3	S	155,2	4,7	33,1	141,6
		V ₁₀	141,3	3,9	36,6	135,9
		R ₁	126,8	5,0	26,2	146,1
	6	S	122,0	4,0	30,9	121,6
		V ₁₀	126,1	3,9	32,6	118,9
		R ₁	122,3	4,3	28,7	120,7
H	BRV 8472 PWUN		119,6 B*	4,2	28,2 B	120,5 B
	BRV 8380 PWUE		132,3 A	4,3	31,7 A	130,8 A
DP (pl m ⁻²)	3		135,9 A	4,5 A	30,3	136,0 A
	6		116,1 B	4,0 B	29,3	115,4 B
MF	S		127,7	4,2	30,1	127,6
	V ₁₀		126,0	4,1	30,8	123,6
	R ₁		124,3	4,4	28,5	125,8
ANOVA						
H			<0,01	ns	<0,05	<0,01
DP			<0,0005	<0,001	ns	<0,0001
MF			Ns	ns	ns	ns
H x DP			Ns	ns	ns	ns
H x MF			Ns	ns	<0,05	ns
DP x MF			Ns	ns	ns	ns
H x DP x MF			Ns	ns	ns	ns

*Letras diferentes dentro de un mismo factor indican diferencias significativas entre medias de los tratamientos.

Para el híbrido BRV 8380 PWUE se observó que aplicaciones más tempranas en el ciclo incrementaron la duración efectiva de llenado respecto a R₁, debido a que en este momento el fertilizante se pudo haber incorporado muy tarde, cuando el cultivo ya había sufrido deficiencias (Fig. 2). Sin embargo, para el híbrido BRV 8472 PWUN no se observó un efecto del momento de fertilización sobre esta variable. En lo que respecta a la tasa de llenado efectiva no hubo efecto del momento de la fertilización (Fig. 3). Si bien para BRV 8380 PWUE se observaron diferencias entre V₁₀ y R₁, no las hubo entre los

momentos más contrastantes (S y R₁), por lo cual no hay un efecto claro de este factor. Las condiciones climáticas del ciclo agrícola 2022/2023 (Fig. 1) probablemente condujeron a una inadecuada incorporación y posterior disponibilidad de N en el suelo, afectando el llenado de granos. Las elevadas temperaturas registradas en dicho período, junto al marcado déficit hídrico, generaron una senescencia anticipada que podría haber afectado fuertemente a los resultados. Esto último explicaría la ausencia de respuesta a la fertilización realizada en R₁ y los bajos valores de

peso final alcanzados en general en esta campaña (2022/2023).

Consideraciones finales

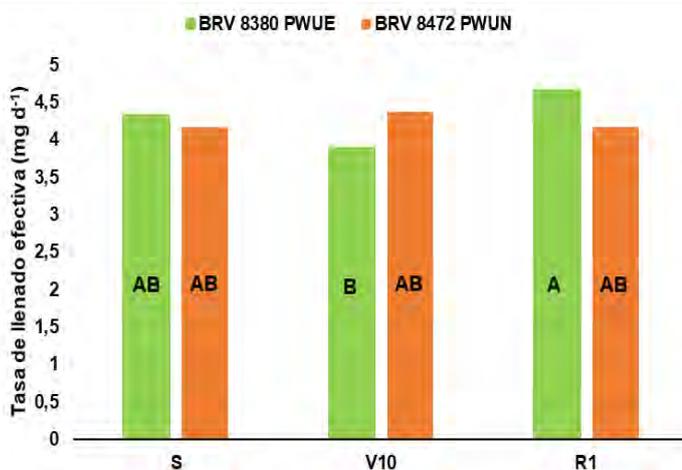


Figura 3: Tasa de llenado efectiva de granos para los híbridos BRV 8380 PWUE (verde) y BRV 8472 PWUN (naranja) según el momento de fertilización (S, V₁₀ y R₁).

El momento de la fertilización nitrogenada no tuvo efecto sobre el peso final de granos. Estos resultados se atribuyen a las condiciones climáticas de la campaña que podrían haber comprometido la incorporación y disponibilidad del nitrógeno y su posterior impacto en el llenado de los granos.

Aun así, estos resultados parciales demostraron el marcado efecto de la DP sobre el peso final y el mayor peso potencial de BRV 8380 PWUE sobre BRV 8472 PWUN, dado por una mayor duración efectiva del llenado, principalmente cuando la fertilización nitrogenada se realizó en momentos más tempranos del ciclo. Para las condiciones analizadas, el retraso de la fertilización hacia periodos reproductivos pudo conducir a reducciones en el peso del grano, principalmente en genotipos con mayor peso potencial, por un acortamiento en la duración del llenado, debido al severo déficit nutricional del cultivo hasta la efectiva disponibilidad de N en el suelo.

Monitoreo de la variación espacio-temporal en la humedad de suelo y estatus N en maíz a escala de lote

Maltese, N.E.^{1,2,3}; Melchiori, R.J.M.¹; Kemmerer, C.A.^{1,2}; Wilson Carrillo⁴; Melchiori, A.E.⁵

¹INTA EEA Paraná, Ruta 11 Km 12,5, Oro Verde, Entre Ríos, Argentina; ²Facultad de Ciencias Agropecuarias, UNER, Ruta 11 Km 10,5, Oro Verde, Entre Ríos, Argentina; ³CONICET; ⁴El Hinojo S.A. ⁵Actividad Privada.

Resumen

Uno de los desafíos más importantes de la agricultura de precisión es cuantificar la variabilidad de los sistemas y cómo ésta afecta la productividad de los cultivos. Entre esto, variaciones en el estatus N y la condición hídrica interactúan generando variaciones en la respuesta del maíz a la fertilización, conocer la variabilidad de ambos a nivel de lote y cómo se relacionan con índices espectrales resulta clave para plantear estrategias de manejo variable de fertilización. El objetivo fue monitorear, a escala de establecimiento, la dinámica espacio-temporal en la humedad de suelo, el estatus nitrogenado y su interacción en un cultivo de maíz utilizando herramientas de sensoramiento remoto y mediciones de validación a campo. El estudio se realizó en el Establecimiento La Palma, Montoya, Entre Ríos (Lat. -32.58; Long. -59.80). Se seleccionaron puntos en áreas con suelos de características diferentes en zonas de baja y alta productividad. En cinco momentos durante el ciclo de cultivo se determinó humedad gravimétrica y se realizaron mediciones con un clorofilómetro Minolta SPAD-502™ para caracterizar el perfil nitrogenado de la canopia, mientras que en dos momentos (V_{15} y R_2), además se tomaron muestras destructivas para determinación de la biomasa por unidad de área y su concentración de N. Se evaluó la evolución del cultivo a través de diversos índices de vegetación (NDVI, GNDVI, EVI, NDRE, CCCI, NBRL, CIRE). El monitoreo del estado del cultivo y su dinámica a escala de establecimiento permitió explorar los efectos de la variabilidad espacio-temporal de los ambientes evaluados, contribuyendo a la evaluar las herramientas de sensoramiento remoto que dieron cuenta de la condición del cultivo. La baja respuesta a la fertilización nitrogenada de las variables monitoreadas fue asociada a las condiciones de estrés hídrico en combinación con la baja densidad de plantas utilizada.

Palabras clave. Índices de vegetación, perfil hídrico, perfil nitrogenado

Introducción

Cuantificar la variabilidad de los sistemas y cómo ésta afecta la productividad de los cultivos, es uno de los desafíos más importantes que tiene la Agricultura de precisión (Mulla y Schepers, 1997). En la actualidad se difunde ampliamente el uso de sensores remotos para el monitoreo de cultivos a escala de predio, de lote y parcelas (Asam et al. 2013). Así, el monitoreo remoto permite, a través de índices espectrales como el NDVI (Rouse et al., 1973) o el NDRE (Gitelson y Merzlyak, 1994) relevar información asociada al vigor, cobertura, biomasa, estatus nitrogenado (N) e hídrico de los cultivos de manera rápida, económica y para grandes escalas (Haboudane et al., 2003; Gitelson et al., 2006). Para el caso del maíz (*Zea mays* L.), la información relevada sirve como soporte a la toma de decisiones de manejo agronómicas, como el ajuste de prácticas de fertilización.

Respecto a la condición nitrogenada, surgen interrogantes relacionados a la precisión con la cual los índices espectrales estiman el estatus N del cultivo, debido a que estos obtienen información del dosel de los cultivos y no se conoce en profundidad su penetración dentro de la canopia. Asimismo, el estatus hídrico del cultivo también puede monitorearse a partir de índices espectrales y vincularse con datos de humedad de suelo asociados a variabilidad edáfica. Debido a que el estatus N y la condición hídrica del cultivo interactúan generando variaciones en la respuesta a la fertilización nitrogenada, conocer la variabilidad de ambos a nivel de establecimiento y cómo se relacionan con índices espectrales resulta clave para plantear estrategias de manejo variable de fertilización. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue monitorear, a escala de lote, la dinámica espacio-temporal en la humedad de suelo, el estatus N y su interacción en un cultivo de maíz utilizando herramientas de

sensoramiento remoto y mediciones dirigidas a campo.

Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en el Establecimiento La Palma, ubicado en Montoya, Entre Ríos (Lat. -32.58; Long. -59.80), en un lote que se sembró

con maíz el 19 de septiembre de 2021 con una densidad de 55000 pl ha⁻¹ con los híbridos LT720 y NK890. La campaña se caracterizó por presentar escasas precipitaciones, en especial durante el período crítico, a lo que se sumaron temperaturas elevadas y persistentes, particularmente durante el periodo de llenado de granos (Figura 1).

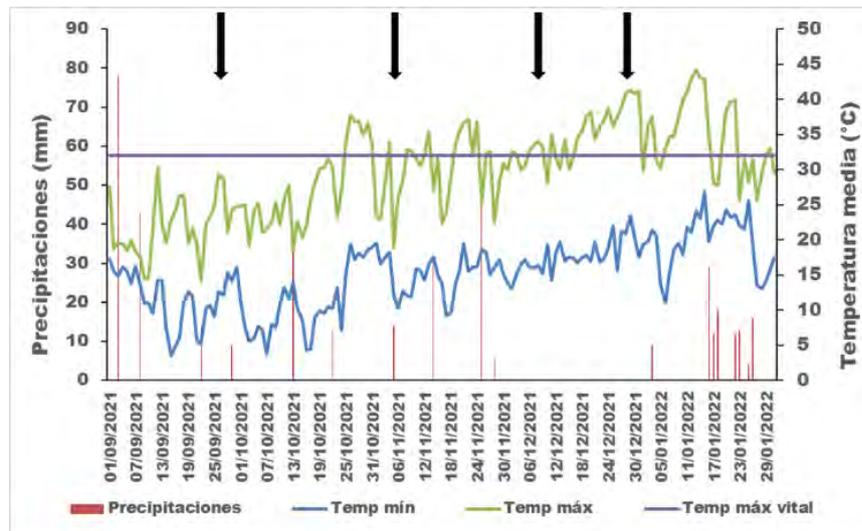


Figura 1. Marcha de las temperaturas mínimas y máximas y distribución de las precipitaciones durante el ciclo de crecimiento del cultivo, obtenidas en la Estación Meteorológica Automática Montoya (Lat. -32.58; Long. -59.89) de la Red de Estaciones de la Bolsa de Cereales de Entre Ríos y registros manuales. Las flechas indican los momentos de muestreo. La línea continua horizontal representa la temperatura máxima de crecimiento del cultivo (33°C).

El establecimiento cuenta con una delimitación de ambientes a nivel de lotes, realizada en base a información previa de mapas de rendimiento disponibles. Los ambientes separan zonas de baja (BP) y alta (AP) productividad. En función de esta ambientación se seleccionaron puntos sobre áreas de suelos con características diferentes (Figura 2). Se realizaron muestreos de suelo para determinar humedad gravimétrica en intervalos de 20 cm hasta un metro de profundidad. Adicionalmente, el 9/12/2021 y el 29/12/2021 se realizaron mediciones en cinco hojas centradas a partir de la hoja de la espiga (HE). Es decir, mediciones de +2 y +4 hojas por encima de la HE (HE+4 hojas, HE+2) y dos hojas por debajo de la HE (HE-2, HE-4). Las mediciones se realizaron con un clorofilómetro Minolta SPAD-502TM en un total de cinco plantas a fin de caracterizar el perfil N de la canopia. En dos de esos momentos

(correspondientes a los estadios de V₁₅ y R₂), se realizaron muestreos destructivos de 5 plantas por punto de muestreo para la determinación de la biomasa por unidad de área, y su concentración de N. Luego a partir de ambas variables se calculó el N acumulado por unidad de área, además, en base a la curva teórica de dilución de N para maíz (Plénet y Lemaire, 2000), fue calculado el índice de nutrición nitrogenada (INN) en cada uno de los momentos de muestreo.

Por otra parte, se evaluó la evolución del cultivo a través del monitoreo con imágenes satelitales. Se generaron mapas para distintos índices de vegetación empleando un programa desarrollado en Phytos para calcular una librería de índices espectrales como se describen en Nobuyuki et al (2019), implementándose en este trabajo la comparación de alguno más comunes (NDVI, GNDVI, EVI, NDRE, CCCI, NBRL, CIRE).

Tabla 1. Descripción de análisis de suelo, N objetivo y dosis de fertilización con N para los ambientes de baja (BP) y alta (AP) correspondientes al establecimiento La Palma, en Montoya, E. Ríos (Lat. -32.58; Long. -59.80).

Ambiente	MO (%)	N-NO ₃ (kg ha ⁻¹) 0-60 cm	P disponible (ppm)	PH	N objetivo	Dosis N (kg N ha ⁻¹)
BP	2.95	37	8	5.5	120	83
AP	2.08	44	11	5.4	160	116

Resultados

Entre los puntos evaluados se observó un gradiente de variabilidad de suelos que evidenciaron respuestas diferentes a nivel de cultivo. Esta respuesta estuvo asociada con la evolución del contenido hídrico y otras propiedades del sitio. Dentro de los sitios

evaluados, algunos de ellos presentaron similitudes que permiten agruparlos. Los puntos 9 y 2 correspondieron a suelos arenosos, mientras que los puntos 4 y 5, en el otro extremo, correspondieron a suelos arcillosos, ubicándose los demás en condiciones intermedias.



Figura 2. Delimitación de ambientes de baja (BP) y alta (AP) productividad y puntos de muestreo.

Los perfiles de humedad obtenidos en las distintas fechas evaluadas muestran variaciones según el tipo de suelo (Figura 3). El punto 9 mostró las mayores disminuciones a través del tiempo en el contenido hídrico en todo el perfil, pero especialmente en las capas superiores. El punto 4 presentó los valores más elevados de humedad en todo el perfil para todas las fechas.

La falta de precipitaciones en el mes de diciembre (figura 1) determinó disminuciones importantes en el contenido hídrico en todos los casos en todas las capas evaluadas y particularmente se expresó alrededor y después de la floración afectando marcadamente el rendimiento del cultivo.

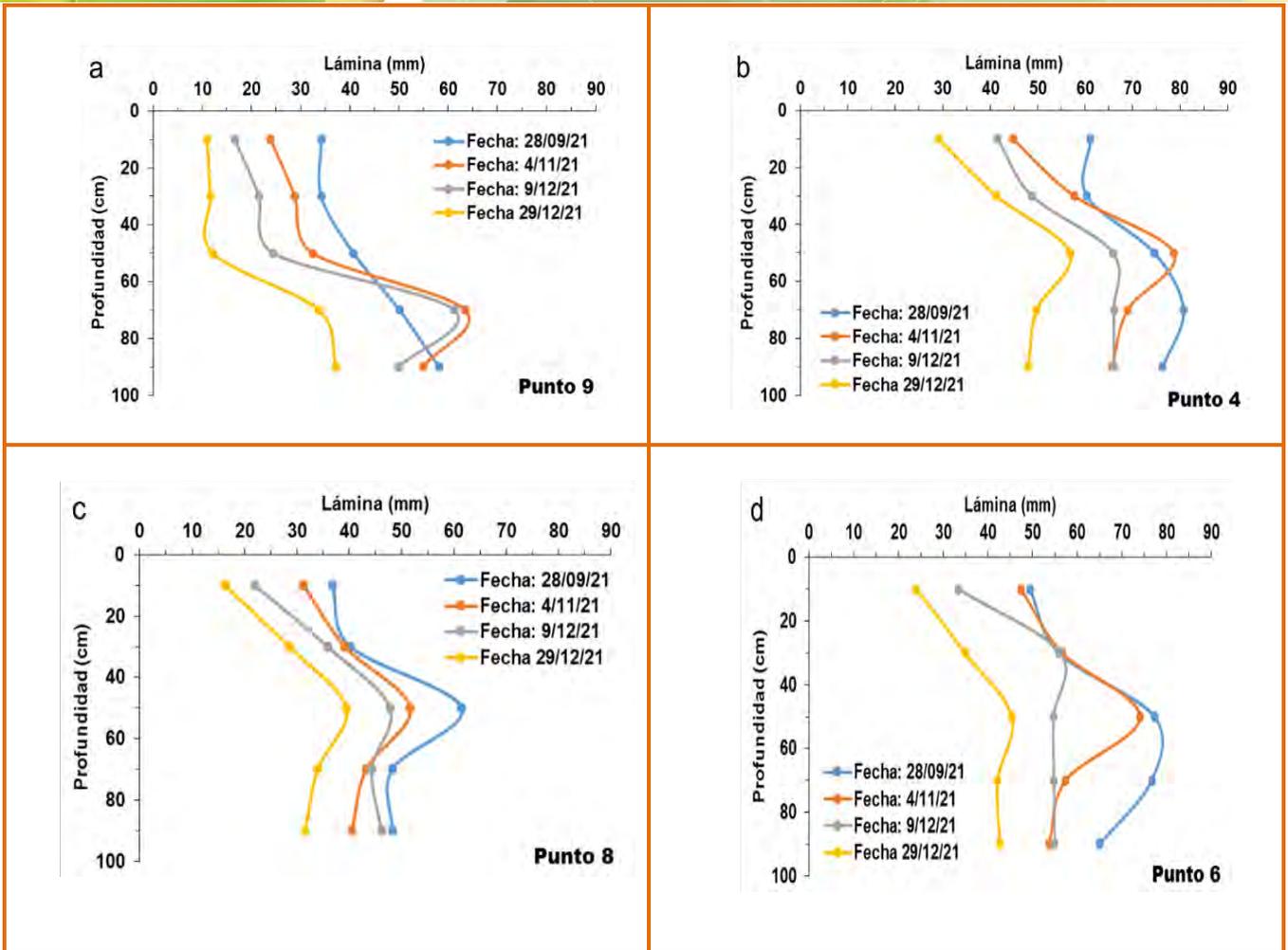


Figura 3. Perfiles de humedad para las fechas evaluadas en los puntos 9 a); 4 b); 8 c) y 6 d)

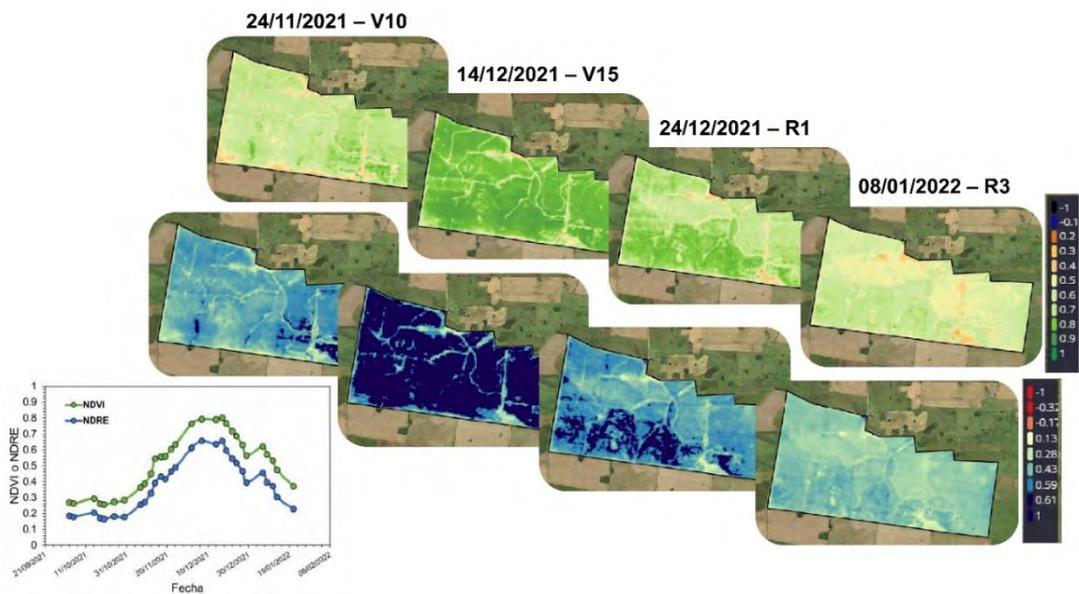


Figura 4. Variabilidad espacio-temporal del NDVI y el NDRE desde siembra a R₃ en el establecimiento La Palma. El cuadro inserto corresponde al valor medio para todo el establecimiento.

Analizando la evolución de dos de los índices más comúnmente utilizados en el monitoreo de cultivos, se observó un crecimiento inicial lento,

alcanzando valores bajos de NDVI y NDRE hasta el estadio de V₁₀, lo cual pudo haber estado asociado a déficits hídricos puntuales y a la baja densidad de plantas utilizada (< 5.5 pl. m⁻²),

conduciendo a bajos niveles de cobertura (figura 4). Comparando los índices NDVI y NDRE, se puede observar que presentan una evolución similar durante todo el ciclo de crecimiento. Sin embargo, al estadio de R_1 el NDRE permite separar mejor algunos ambientes comparado con NDVI, debido a que tiene mayor tendencia a saturar en valores cercanos o superiores a 0.8.

En cada sitio se evaluó el crecimiento y los perfiles de estatus N en las plantas, los que mostraron variaciones para los diferentes tipos de suelo y ambientes de productividad (figura 5). En general, para todos los puntos evaluados, se puede observar un mayor estatus N en los estratos superiores y medios de la canopia, mientras que en los estratos basales el estatus disminuye acorde a la removilización de fotoasimilados desde las hojas más viejas hacia el destino reproductivo principal (espiga). Las mayores variaciones del estatus N entre estratos foliares se observaron en el Punto 9 y las menores en el Punto 8, mientras que los Puntos 6 y 4 mostraron variaciones intermedias, comportamiento acorde a las características productivas del sitio (fertilidad).

El monitoreo satelital, incluyó 4 fechas de observación centradas el periodo de 30 días alrededor de la floración, e incluyó todos los índices. Las condiciones iniciales de la campaña, si bien no fueron favorables, permitieron obtener un adecuado nivel de crecimiento inicial, obteniendo, en V_{15} , valores medios de ca. 7400 kg ha^{-1} y 67.1 kg N ha^{-1} de biomasa y N acumulado en planta, respectivamente. Mientras que en R_2 , ésta variables tuvieron valores medios de ca. 11400 kg MS ha^{-1} y 62.8 kg N ha^{-1} , respectivamente (Tabla 2).

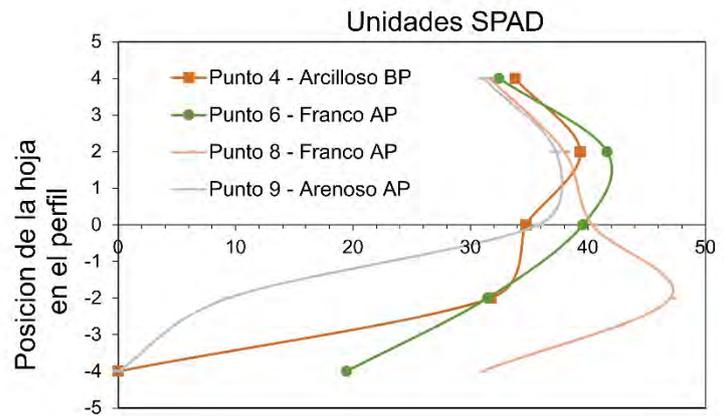


Figura 5. Perfiles de estatus N medidos con SPAD-502™ para puntos contrastantes en su textura de suelo (Arcilloso, Franco, Arenoso) y productividad (Alta, AP y Baja BP) para el 29/12/2021. El valor “0” sobre el eje Y corresponde a la hoja de la espiga.

Con esta información y en base a la curva teórica de dilución de N para maíz, el INN en ambos momentos permaneció por debajo del nivel de suficiencia, i.e. $INN < 1$, con un rango de variación de 0.33 a 0.83 y 0.27 a 0.55 para V_{15} y R_2 , respectivamente (Tabla 2). Acorde a esto, el estatus N solo evidenció cambios en los estratos inferiores de la canopia en R_2 . Se evidenciaron diferencias en el estatus N entre estratos foliares acorde a la distribución de N en las plantas, disminuyendo de manera más notable el valor SPAD por debajo de las hojas de la espiga (HE-4). No obstante, no se encontraron relaciones entre los índices de vegetación y el estatus N en estratos inferiores, probablemente debido a que la reflectancia se determina por el área foliar por sobre la hoja de la espiga. En este sentido, las asociaciones más estrechas entre los índices y el valor SPAD se lograron a nivel de la hoja de espiga o superior, solo en la última fecha analizada (14/12/2021) y el momento de R_2 , sin diferencias importantes entre índices (dato no mostrado).

Tabla 2. Materia seca por unidad de área (MS), su concentración de N (Conc. N), N acumulado por unidad de área (Nac) y el índice de nutrición nitrogenada (INN) para los 10 puntos evaluados y dos momentos de medición (V_{15} y R_2) correspondientes al establecimiento La Palma, en Montoya, E. Ríos (Lat. -32.58; Long. -59.80).

Punto	12/9/2021 (V_{15})				12/29/2021 (R_2)			
	MS (Kg MS ha ⁻¹)	Conc. N (%)	Nac (Kg N ha ⁻¹)	INN	MS (Kg MS ha ⁻¹)	Conc. N (%)	Nac (kg N ha ⁻¹)	INN
1	7308	0.792	57.9	0.49	11896	0.502	59.71	0.37
2	7765	1.004	78.0	0.63	13126	0.719	94.31	0.55
3	7210	0.546	39.4	0.33	10155	0.443	44.98	0.31
4	7615	0.714	54.3	0.44	13071	0.408	53.39	0.31
5	7273	0.728	53.0	0.45	13698	0.349	47.86	0.27
6	6897	1.211	83.5	0.73	10625	0.517	54.90	0.36
7	6108	0.748	45.7	0.43	8731	0.817	71.32	0.54
8	6463	0.876	56.6	0.51	10334	0.733	75.77	0.51
9	9340	1.240	115.8	0.83	---	---	---	---
10	8250	1.048	86.5	0.67	---	---	---	---

Conclusiones

El monitoreo del estado nutricional del cultivo de maíz y su dinámica a escala de establecimiento permitió explorar los efectos de la variabilidad espacio-temporal de los diferentes ambientes evaluados, contribuyendo a la selección de las herramientas de sensoramiento remoto que dieron cuenta de la condición real del cultivo. En esta experiencia, la relación entre las mediciones dirigidas a campo y el valor medido a través de los índices de vegetación, pudo haber sido afectado por el déficit hídrico del cultivo, particularmente más marcado durante el periodo de llenado de granos.

Agradecimientos

A la empresa El Hinojo S.A. por su colaboración para llevar adelante este trabajo. El mismo fue financiado con fondos del proyecto I177 del INTA.

Referencias

- Asam, S., Fabritius, H. Klein, D., Conrad, C. & Dech, S. (2013) Derivation of leaf area index for grassland within alpine upland using multi-temporal RapidEye data. *International Journal of Remote Sensing*, doi.org/10.1080/01431161.2013.845316
- Gitelson, A. & Merzlyak, M. (1994) Quantitative

estimation of chlorophyll using reflectance spectra. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, [https://doi.org/10.1016/1011-1344\(93\)06963-4](https://doi.org/10.1016/1011-1344(93)06963-4)

- Gitelson, A., Viña, A., Verma, S., Rundquist, D., Arkebauer, T., Keydan, G. & Suyker, A. (2006). Relationship between gross primary production and chlorophyll content in crops: Implications for the synoptic monitoring of vegetation productivity. *Journal of Geophysical Research*, <https://doi.org/10.1029/2005JD006017>
- Haboudane, D., Miller, J., Pattey, E., Zarco-Tejada, P. & Strachan, I. (2003) Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture, *Remote Sensing of Environment* <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.12.013>
- Mulla, D. J.; Schepers, J. S. (1997). Key processes and properties for site-specific soil and crop management. *The state of site-specific management for agriculture*, 1-18.
- Nobuyuki Kobayashi, Hiroshi Tani, Xiufeng Wang & Rei Sonobe (2019): Crop classification using spectral indices derived from Sentinel-2A imagery, *Journal of Information and Telecommunication*, DOI: 10.1080/24751839.2019.1694765.
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J. & Deerin, D. (1973) Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. N. SP-351. Ed Third ERTS Symposium. 1: 309-317. Washington.

Fertilización nitrogenada en maíz para silo - mayor rendimiento y calidad

Gonzalo Berhongaray ^{1,2} y Oscar Zen ²

¹ ICiAgro Litoral (UNL-CONICET) bgonzalo@agro.uba.ar, ² Facultad de Ciencias Agrarias, UNL

Introducción

El maíz es un cultivo de gran importancia en la producción agrícola de Argentina. Además, es un alimento fundamental para la alimentación de los establecimientos lecheros, ya sea como grano o silo. En la región pampeana, la disponibilidad de nitrógeno en el suelo puede limitar el rendimiento del maíz, lo que hace que la fertilización nitrogenada sea esencial para mantener altos niveles de producción. Sin embargo, en la región centro de Santa Fe, una de las cuencas lecheras más importantes del país, existe una falta de información sobre la toma de decisiones en cuanto a la fertilización nitrogenada, lo que hace que sea crucial investigar los efectos de esta práctica en los híbridos de maíz destinados a grano y silo en la región. El objetivo general de este trabajo fue evaluar el impacto de la fertilización nitrogenada en la producción de maíz con destino grano y silo, y analizar la respuesta a diferentes fuentes y dosis de fertilizantes nitrogenados. Con este fin, se realizaron tres ensayos en distintas localidades del centro de la provincia de Santa Fe: Franck, Rafaela y Gobernador Crespo. Los objetivos de cada ensayo fueron diferentes y específicos para cada localidad. En Franck, se buscó evaluar el impacto de la fertilización nitrogenada en la producción de dos híbridos de maíz destinados a grano y silo. En Crespo, el objetivo fue evaluar la respuesta del cultivo de maíz para grano y silo a diferentes dosis de fertilizante nitrogenado. En el caso de Rafaela, el objetivo principal fue evaluar la respuesta a la aplicación de enmiendas orgánicas de digestatos en combinación con fertilizante nitrogenado químico. Cada uno de estos ensayos se llevó a cabo siguiendo un diseño experimental riguroso. Los detalles de cada sitio y diseño experimental se detallan a continuación.

FRANCK

El ensayo se realizó en un lote de producción cercano a la localidad de Franck, sobre un complejo de suelos es 70 % Argiudol típico y 30 % Argiudol ácuico y 10 años en el sistema de siembra directa. En la campaña 2017, se aplicaron

4000 kg ha⁻¹ de cama de pollo. El análisis previo a la siembra del ensayo arrojó que el suelo disponía 2.4 % de materia orgánica, pH= 5.95 y fósforo extractable de 13.9 ppm (Bray I). Para los ensayos se utilizaron dos híbridos de maíz, KWS 3916 granífero y KWS 4360 aptitud silera (KWS Argentina SA). La siembra se realizó el 05 de septiembre de 2019 con una sembradora de siembra directa provista de una cuchilla labradora turbo que provoca una gran remoción hasta los 20 cm de profundidad y un distanciamiento entre surcos de 52 cm. Para ambos híbridos se realizó igual manejo, se fertilizaron a la siembra con fosfato diamónico (DAP) 75 kg ha⁻¹ junto a la semilla, para cubrir los requerimientos de fósforo y 75 kg ha⁻¹ de urea al costado de la línea de siembra, el aporte de nitrógeno de los fertilizantes más el nitrógeno de nitratos disponible determinado (0 - 60 cm) fue de 84 kg ha⁻¹. La densidad de plantas lograda fue de 73173 pl ha⁻¹. En cada híbrido se aplicó un diseño experimental en bloques completamente aleatorizados con 3 repeticiones, los tratamientos evaluados consistieron en 5 niveles de fertilización nitrogenada (0, 55, 110, 165 y 220 kg N ha⁻¹) utilizando como fuente UAN (32 % N). El UAN se aplicó chorreado en V6 según escala Ritchie & Hanway (1982). En estado R4 (grano pastoso) se determinó biomasa aérea total en ambos híbridos, se cortaron las plantas de dos surcos apareados en una distancia de 1 metro lineal en 3 posiciones dentro de cada parcela, se pesaron y se determinó calidad mediante un NIRS portátil (AgriNIR Analyzer W, Dinamica Generale, Italia). En el híbrido silero se separaron la biomasa aérea en hoja, tallo y mazorca y se llevó a estufa para determinar producción de materia seca (MS) por unidad de área. En estado R6, madurez fisiológica se determinó rendimiento, se cosecharon los granos, se secaron en estufa y luego se ajustó el rendimiento a humedad comercial de 14,5 %. La eficiencia agronómica (EA) se calculó como el incremento en biomasa o grano por kg N agregado.

La biomasa aérea acumulada al estado R4 en el híbrido granífero y silero fue afectada positivamente por la disponibilidad de nitrógeno (Figura 1). La producción aumentó de ~17000 kg MS ha⁻¹ sin fertilizar, hasta 22000 kg MS ha⁻¹ en los fertilizados. La EA en biomasa fue constante

en el híbrido granífero, mientras que en el híbrido silero fue mayor a la dosis más baja de nitrógeno y casi cinco veces menor para las dosis mayores. La respuesta del híbrido silero a la fertilización estuvo explicada por el aumento en la producción de biomasa de espiga. No se encontró efecto de la fertilización en la producción de biomasa de tallo

y hojas. Se encontró una relación entre la disponibilidad de nitrógeno y la calidad de la biomasa en el híbrido silero (Figura 2). Se observaron reducciones sobre la FDN y la FDA al aumento de nitrógeno, sin embargo, no se vieron relaciones con la proteína y el almidón.

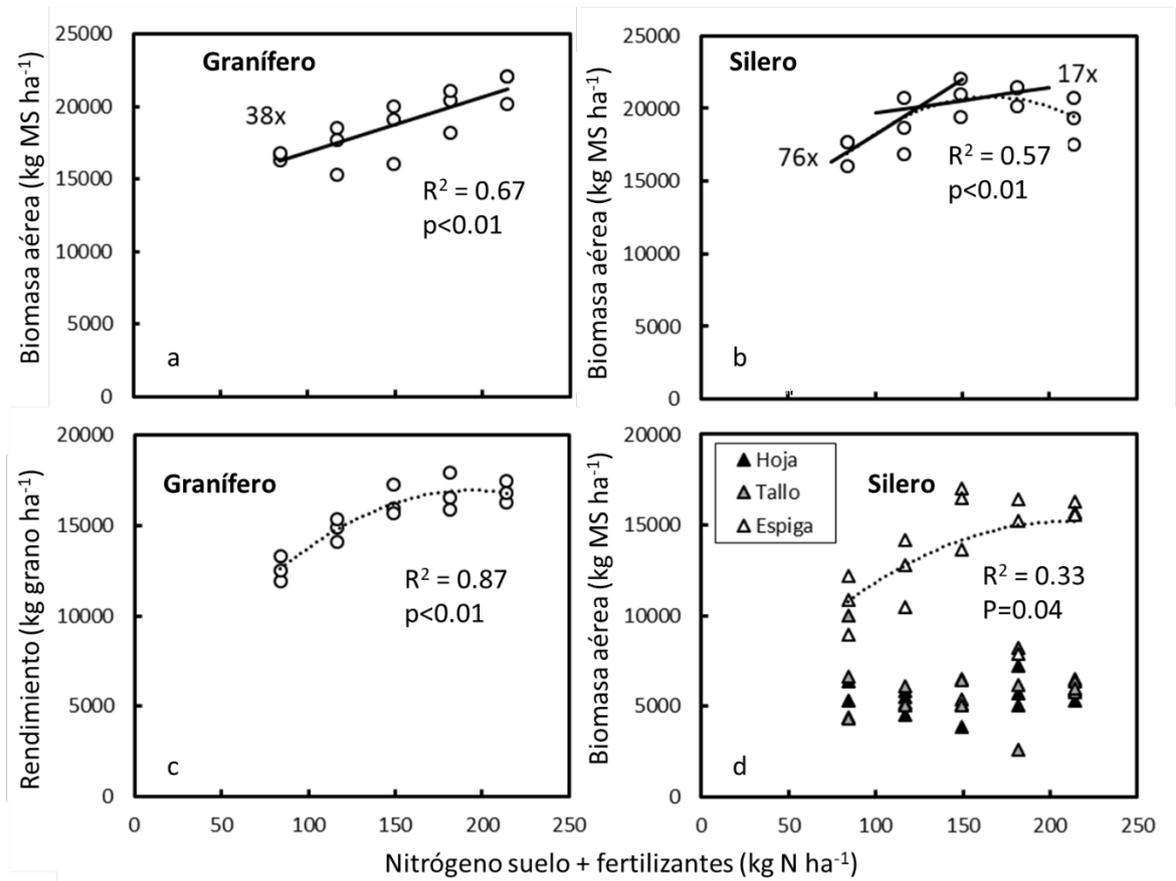


Figura 1: Biomasa aérea acumulada (kg MS ha⁻¹) en el híbrido granífero (a) y silero (b) y rendimiento de grano (corregido a 14,5 % de humedad; kg ha⁻¹) en el híbrido granífero (c), y producción de biomasa aérea en componentes (kg MS ha⁻¹) para el híbrido silero (d), según disponibilidad inicial de nitrógeno (suelo + fertilizante; kg N ha⁻¹).

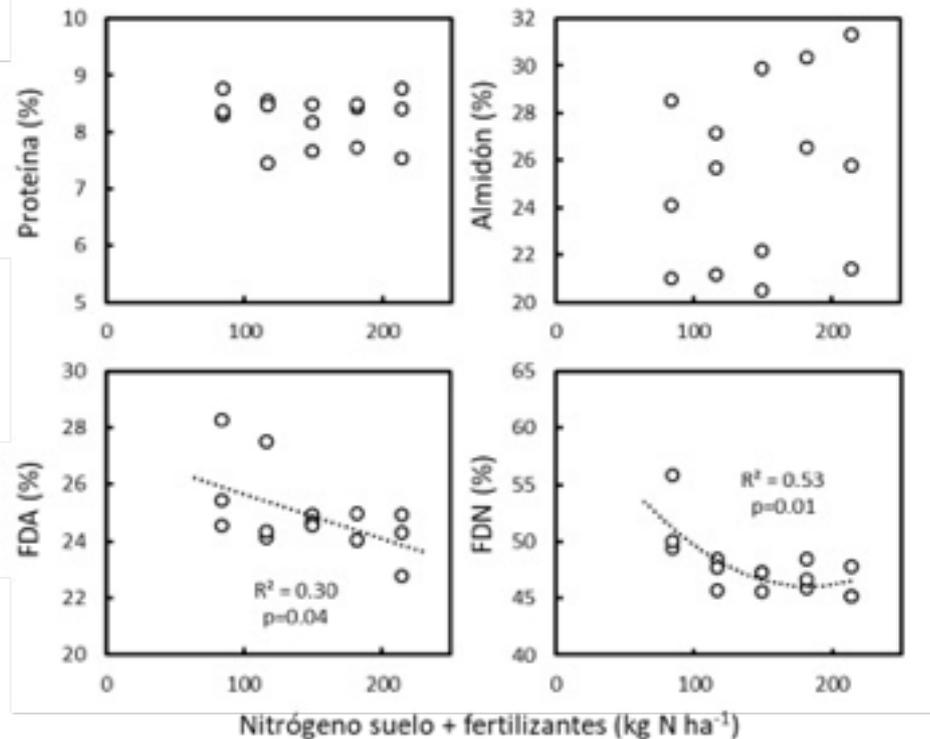


Figura 2. Efecto de la disponibilidad inicial de nitrógeno (suelo + fertilizante) en kg N ha^{-1} sobre la calidad de la biomasa cosechada en el híbrido silero en Franck.

Gdor. CRESPO

El experimento se llevó a cabo en lote comercial ubicado a 6 km al norte de la localidad de Gobernador Crespo sobre un suelo Argiudol Ácuico. El 10 de septiembre de 2020 se sembraron dos híbridos de maíz uno de aptitud silero: KM 4360 AS-GL Stack y otro granífero: KM 3916 GL Stack / VIP3 (KWS Argentina SA). Ambos fueron sembrados en Siembra Directa y fertilizados con 215 kg de una mezcla química (N: 25,2%, P: 36,6%, S:21%, Zn: 2,1%; MicroEssentials® SZ®). La densidad de plantas alcanzada fue de $\sim 60.000 \text{ pl ha}^{-1}$. En la etapa de crecimiento V6, se aplicaron 5 niveles de fertilización nitrogenada como tratamientos (0, 55, 110, 165 y 220 kg N ha^{-1}), utilizando UAN (32% N). Cada parcela constaba de 4,5 metros de ancho y 100 metros de largo, realizando en bloques de 3 repeticiones de cada tratamiento de manera totalmente aleatorizado. El 14 de enero de 2021 en el estado R5.5 (media línea de leche), se determinó la biomasa aérea del híbrido silero. Para ello se eligieron 3 posiciones dentro de cada parcela, se cortaron a una altura de 25 cm del suelo, todas las plantas de dos filas pareadas en una distancia de 1 m. La biomasa fue pesada, picada y enviada al laboratorio para la determinación de

composición nutricional mediante la técnica NIRS (Laboratorio Rock River, Argentina). Se eligió una planta representativa de cada posición y su biomasa se repartió en hoja, tallo y mazorca y se colocó en estufa de aire forzado a 60° para la determinación de materia seca (MS). El 23 de marzo de 2021 se determinó el rendimiento en grano en los dos híbridos. Para ello, se cosecharon manualmente en 3 posiciones cosechando 3 metros de largo en 2 surcos en cada uno de los tratamientos y repeticiones. Se determinó el rendimiento de grano con corrección por humedad.

La biomasa de maíz aumentó con el incremento de la fertilización con nitrógeno (Figura 3). La biomasa máxima se alcanzó a la dosis de 110 kg N ha^{-1} , con un aumento de 5000 kg MS ha^{-1} (+ 49%) en el rendimiento de biomasa en comparación con el tratamiento con nitrógeno cero. No se encontraron cambios en las proporciones de los componentes de la biomasa las distintas dosis de N, con un aporte promedio de 45,5% por mazorcas, 30,5% por hojas y 24% por tallos. Se encontró un aumento significativo en la biomasa de cada componente a mayor a mayor dosis de N.

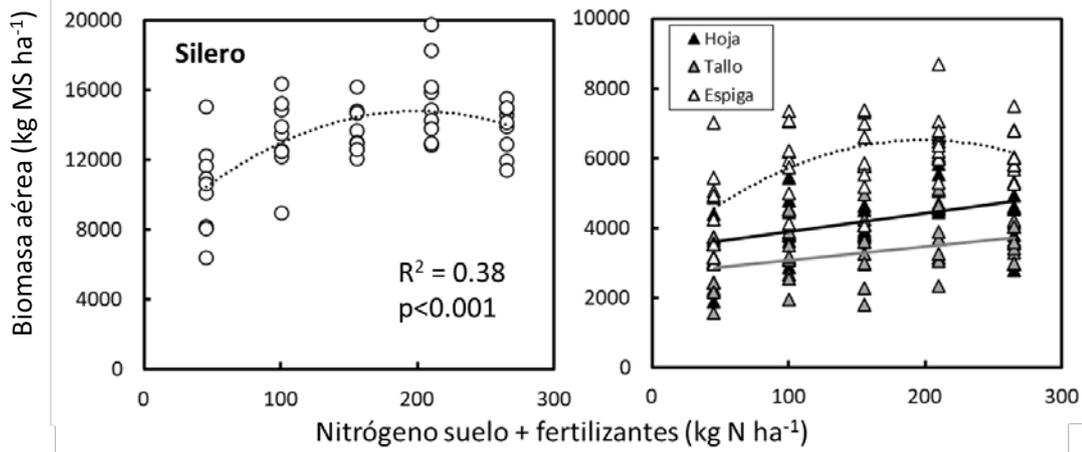


Figura 3: Efecto de la fuente y dosis de nitrógeno sobre el rendimiento de biomasa aérea y sus componentes en maíz silero (kg MS ha⁻¹). Círculos blancos biomasa total, triángulos negros biomasa en hojas, triángulos grises biomasa en tallos y triángulos blancos espiga.

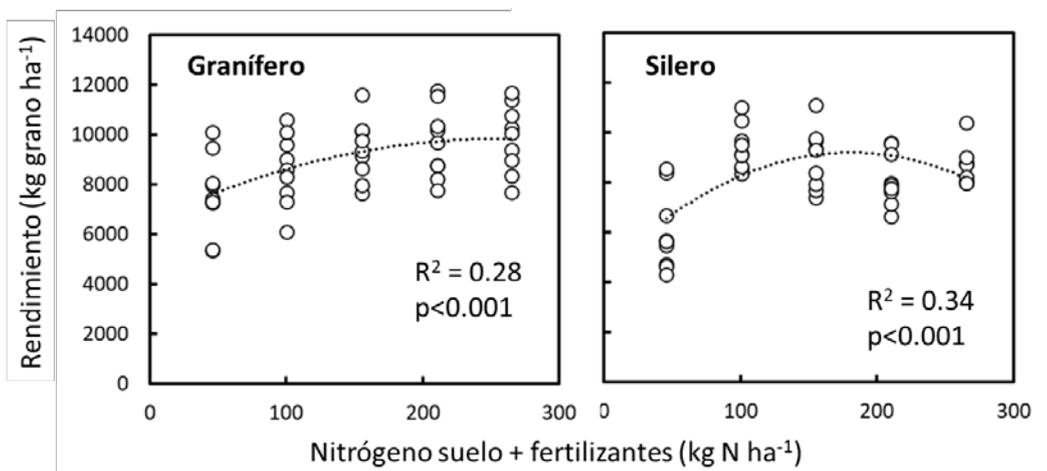


Figura 4: Rendimiento de grano (corregido a 14,5 % de humedad; kg ha⁻¹) en el híbrido granífero (izquierda) y en el híbrido silero (derecha), según disponibilidad inicial de nitrógeno (suelo + fertilizante; kg N ha⁻¹).

El aumento de la dosis de nitrógeno incrementó la proteína cruda, pero no tuvo ningún efecto sobre las concentraciones de FND, almidón y lignina (Figura 5). El nivel de proteína más alto se logró con la dosis de 165 kg N ha⁻¹ (390 l UAN). Aunque no se observó ningún efecto de la fertilización sobre la FND, hubo un aumento significativo en su digestibilidad (TTNDFD, datos

no mostrados). Si bien no hubo aumentos en las concentraciones de almidón, el rendimiento de ambas variables por hectárea fue mayor en los tratamientos fertilizados que en el control sin fertilización debido a los aumentos en el rendimiento de biomasa (Figura 3). Esto muestra que no hubo efecto de dilución a niveles más altos de producción de biomasa.

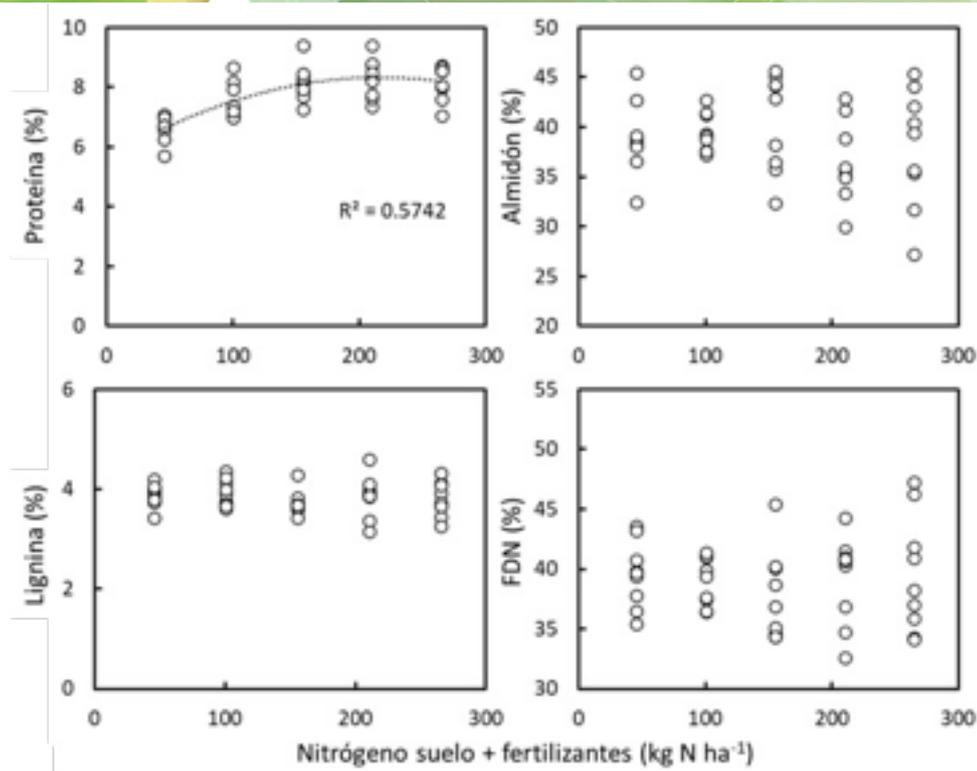


Figura 5: Efecto de la disponibilidad inicial de nitrógeno (suelo + fertilizante) en kg N ha⁻¹ sobre la calidad de la biomasa cosechada en el híbrido silero en Gdor. Crespo.

RAFAELA

El ensayo se realizó en zona rural de la localidad de Susana, en un suelo Argiudol típico, el mismo conto con la aplicación de enmiendas orgánicas de digestatos, efluente de un biodigestor. Para la definición de los tratamientos se realizó una toma de muestra del Digestatos y se analizó su composición química, además se realizó un análisis de suelo, y se determinaron que 92 kg N ha⁻¹ estaban disponibles en la capa de suelo 0-60 cm. Seguidamente e aplicaron tres dosis de digestatos: 102500, 205000 y 307500 lt ha⁻¹, equivalentes a 46, 92 y 138 kg N ha⁻¹, considerando un coeficiente de mineralización del 60% del N orgánico y un 10% de perdidas por volatilización (valores usados en función de resultados obtenidos en ensayos de la Cátedra de Diagnóstico y Tecnología de Tierras FCA UNL). Cada una de las dosis más un testigo sin aplicación conformaron 4 tratamientos, y los mismos se replicaron aleatoriamente en 3 bloques. La siembra se realizó el 7 de septiembre de 2020 utilizando el híbrido 4360 G con destino silaje (KWS Argentina), el mismo se sembró con

una densidad de 3.6 plantas por metro lineal, utilizando una sembradora neumática. En la mitad de cada parcela de cada tratamiento, la siembra de maíz incluyó la aplicación de 280 kg ha⁻¹ de urea, esto aportó 128.8 kg de N/ha⁻¹. El 13 de enero de 2021 se realizó la cosecha del ensayo. En cada parcela se eligieron al azar 3 sitios, en los cuales se determinó la biomasa en dos surcos a lo largo de un metro. La biomasa fue pesada, picada y enviada al laboratorio para la determinación de composición nutricional mediante la técnica NIRS (Laboratorio Rock River, Argentina). Se eligió una planta representativa de cada posición y su biomasa se repartió en hoja, tallo y mazorca y se colocó en estufa de aire forzado a 60° para la determinación de materia seca (MS).

Los mayores rendimientos se obtuvieron en la combinación de fertilizante orgánico y urea (Figura 6). Con aplicaciones de 300 kg de N total se logró una respuesta de 5720 kg MS ha⁻¹ respecto al testigo. La aplicación de nitrógeno afecto en forma positiva la producción de biomasa en hojas y tallos (Figura 7). En este caso, no se encontraron efectos de la fertilización y la calidad de la biomasa producida (Figura 8).

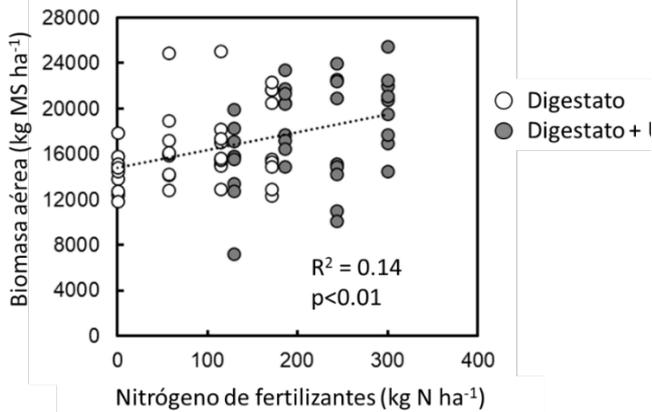


Figura 6: Biomasa aérea (kg MS ha⁻¹) según la oferta de nitrógeno orgánico (digestatos en blanco) y mineral (UREA en gris) en kg N ha⁻¹

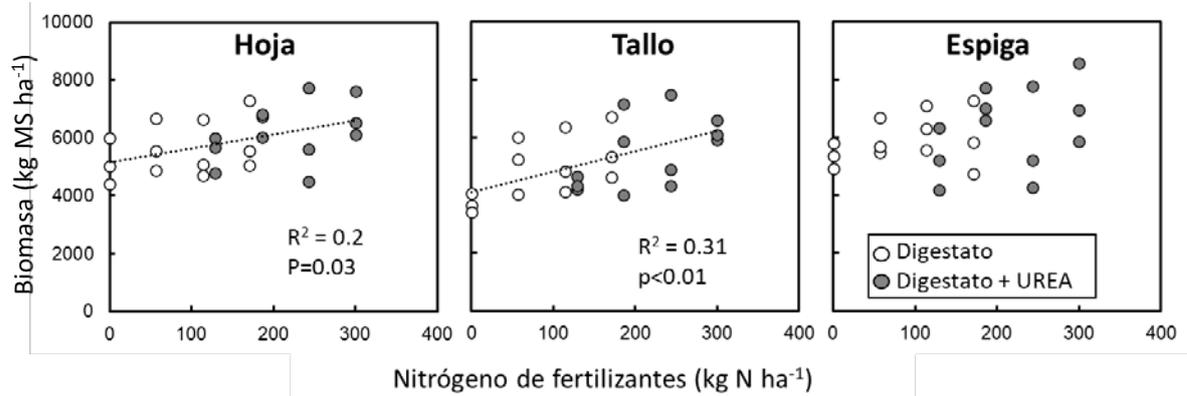


Figura 7: Biomasa en los componentes (kg MS ha⁻¹) de híbrido silero según la oferta de nitrógeno orgánico (digestatos en blanco) y mineral (UREA en gris) en kg N ha⁻¹.

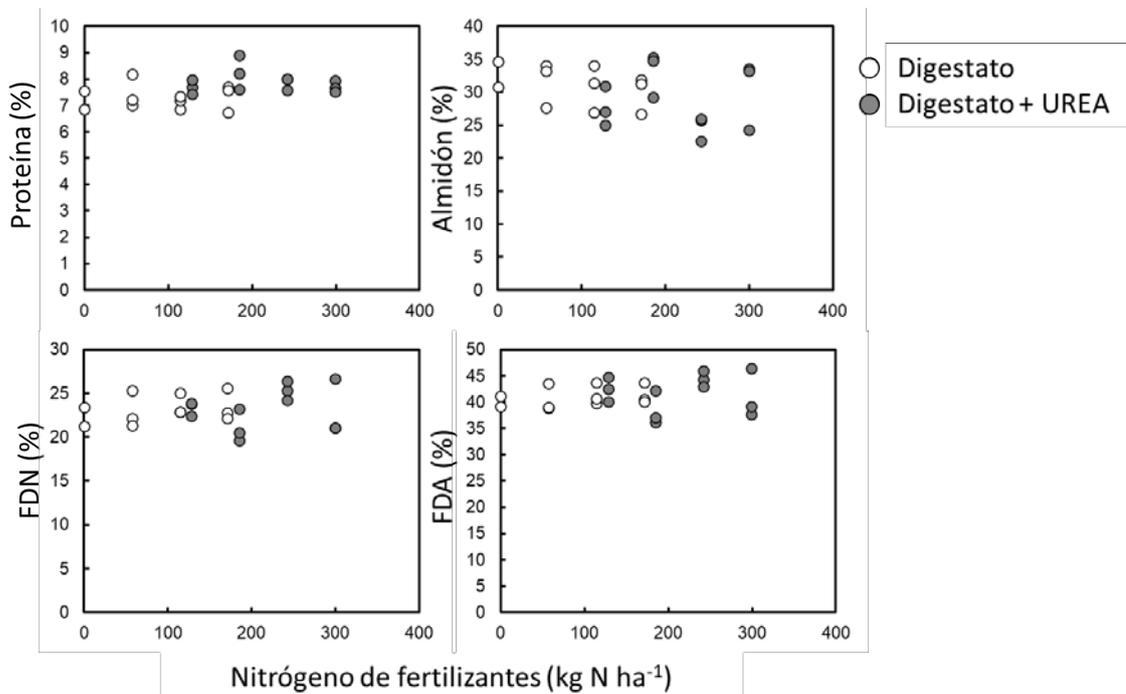


Figura 8: Efecto de la aplicación de nitrógeno orgánico (digestatos en blanco) y mineral (UREA en gris) en kg N ha⁻¹ sobre la calidad de la biomasa cosechada en el híbrido silero en Rafaela.

Conclusiones

Se encontraron altas respuestas a la fertilización nitrogenada en maíces con destino a

silero. Las máximas producciones de biomasa se alcanzaron a disponibilidades de nitrógeno altas, en torno a los 200 kg N ha⁻¹. Este es un aspecto

muy importante ya que en maíces con destino a silaje normalmente se suelen usar dosis que son de la mitad o un tercio de las dosis en maíces para grano. Las mayores producciones y la mejor calidad nutricional logradas con la fertilización con nitrógeno podrían mejorar la eficiencia de producción animal como ser carne o leche. Estos aspectos deben tenerse en cuenta al evaluar la respuesta económica y ambiental de la fertilización.

Agradecimientos

Agradecemos especialmente a los productores y a los equipos de los campos, porque nos

abrieron las puertas de sus establecimientos y pusieron todo a disposición para realizar los ensayos: Dardo Heizen, Paviotti Rubén e Ing. Joaquín Alquatti, a los estudiantes que realizaron los seguimientos de los ensayos y las determinaciones: Matías Pozzo, Santiago Zapata y Mario Giergoff, así como los distintos técnicos de empresas y asesores que nos acompañaron: Dr. José Maiztegui, Ing. Marcelo Chiaravigio, Ing. Pablo Lorenz e Ing. Mauricio Acosta. El proyecto recibió financiamiento de la provincia de Santa Fe (ASACTEI, Código No: IO-2017-00063), y soporte de la empresa KWS Argentina.

Nanotecnología: desarrollo y pruebas de fertilizantes de última generación

Gonzalo Berhongaray^{1,2} y Gustavo Mendow^{3,4}

¹ ICiAgro Litoral (UNL-CONICET), ² Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral, ³ INCAPE (UNL-CONIET), ⁴ Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral
bgonzalo@agro.uba.ar

Introducción

El desarrollo de la nanotecnología, en los últimos años, ha avanzado mucho teniendo múltiples aplicaciones. Los nanofertilizantes se definen como materiales en la escala nanométrica, que contienen macro y micronutrientes que se entregan a los cultivos de forma controlada y por lo tanto de manera más eficiente. Los nanofertilizantes podrían ser un desarrollo crucial en la protección del medio ambiente porque se pueden aplicar en cantidades más pequeñas en comparación con fertilizantes tradicionales. Sin embargo, la investigación en nanofertilizantes es muy incipiente y existen aún muchos inconvenientes en la síntesis y en la aplicación real. Son numerosos los desafíos, desde la producción hasta las pruebas a campo. Es necesario definir productos a utilizar, dosis, momentos, entre otros aspectos.

Los grupos de investigación ICiAgro e INCAPE ambos de la UNL y CONICET, han avanzado en la síntesis de distintos nanofertilizantes y con distintos objetivos y distintos cultivos. El objetivo central de estos grupos de investigación es desarrollar y sintetizar nanofertilizantes que permitan incrementar los rendimientos de cultivos, respecto a los fertilizantes convencionales, aumentando la eficiencia de uso y cuidando el recurso suelo y el medio ambiente. Los objetivos específicos son:

1. Investigar revisando publicaciones y desarrollo de nanofertilizantes. Estudiar sus técnicas, fuentes y evaluar su posible desarrollo local.
2. Desarrollar e implementar métodos sencillos y económicos de producción de nanopartículas de fertilizantes.
3. Evaluar de los fertilizantes en cultivos comerciales, primero en condiciones controladas y luego a campo.
4. Comparar los incrementos de rendimiento y eficiencia de nitrógeno respecto a los fertilizantes comerciales más utilizados.

A continuación, presentamos el estado de arte de las investigaciones realizadas por estos grupos.

Nitrógeno

El nitrógeno (N) es el fertilizante más explorado por este grupo, y esto se debe a la alta demanda y a los convenios realizados con empresas del sector. Esta demanda está ligada a los cultivos de cereales, los cuales tienen una alta demanda tecnológica y son comunes las fertilizaciones en búsqueda de altos rendimientos. Las fertilizaciones son generalmente apuntadas a corregir N utilizando en general fertilizaciones de N al suelo, siendo las fertilizaciones con otras fuentes y formas de aplicación muy poco frecuentes. La eficiencia de la fertilización nitrogenada es afectada por la susceptibilidad a pérdida de N. Las salidas de mayor magnitud se dan por volatilización del gas amoníaco, la desnitrificación en condiciones de anaerobiosis, y la lixiviación por la que se lavan nitratos por debajo de la profundidad de enraizamiento. La fertilización sostenible con N sigue siendo un tema crítico en la agricultura global. Las altas tasas de fertilización con N están expuestas a pérdidas, con fuertes impactos ambientales. Además, la fertilización con N representa el 50% del costo de los cultivos de cereales, por lo que los aumentos en la eficiencia del uso de N (NUE) proporcionarán reducciones en el costo de producción de cereales y beneficios ambientales.

El interés en desarrollar nano-fertilizantes ha aumentado dada la necesidad de fuentes de nutrición más eficientes. Como consecuencia, los efectos positivos de los nano-fertilizantes sobre el crecimiento de los cultivos pueden ocurrir en dosis más bajas, o combinando aplicaciones al suelo y foliar. Sin embargo, su uso como fertilizante foliar tiene los desafíos de no resultar fitotóxico para las hojas.

Desde hace 4 años se viene trabajando en el desarrollo de un nano-fertilizante a base de

nitrógeno, constituido por nano-cápsulas para la liberación controlada de nitratos, amonio y urea. Estos fertilizantes han sido sintetizados y caracterizados. En las imágenes se puede observar que la forma del sólido de bastón alargado, y también, se observa que la nanopartícula tiene un ancho de

aproximadamente 20 nm mientras que su longitud ronda los 100 nm (lo que nos garantiza que son realmente nanopartículas). Sin embargo, lo más relevante es observar los poros que presenta, ya que es en ellos donde se deposita el nitrógeno, que luego será liberado lentamente.

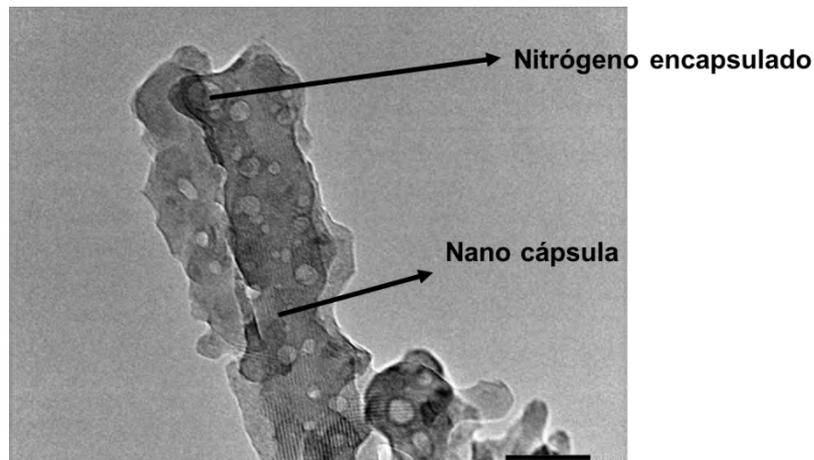


Figura 1. Caracterización de las nano-cápsulas de nitrógeno en microscopio electrónico de barrido.

Se evaluó en ensayos a campo, la efectividad y el comportamiento del nanofertilizante en distintas dosis y momentos de aplicación, en los cultivos de trigo y maíz, en comparación con el manejo tradicional de fertilización. El nanofertilizante tuvo una destacada respuesta en los cultivos de trigo y maíz, tanto en rendimiento como en calidad. En cuanto a los rendimientos, con un 35% menos de dosis de N y al mismo momento de aplicación de Urea, se encontró que en promedio los rendimientos a favor del nanofertilizante fueron de 150 kg/ha y 900 kg/ha para el caso del trigo y maíz respectivamente.

Fósforo

En los últimos años, el uso de nanopartículas de fosforo en el cultivo de soja ha despertado un gran interés en el campo de la agricultura. Se ha demostrado que el uso de nanopartículas fosfatadas como fertilizante puede aumentar el

rendimiento y la calidad de los granos, así como mejorar la absorción de nutrientes. Además, el uso de este tipo de fertilizantes puede reducir la contaminación ambiental y el impacto en los ecosistemas, al disminuir la necesidad de aplicar grandes cantidades de fertilizantes químicos.

Las nanopartículas fosfatadas se producen a través de diversas técnicas, pero una de las más utilizadas es la síntesis en solución acuosa. Este proceso comienza con la disolución de precursores inorgánicos en una solución acuosa. Luego, se añade un agente de precipitación, para provocar la formación de núcleos de cristales, que posteriormente son triturados y sometidos a procesos de desagregación y dispersión para obtener las nanopartículas. Actualmente se ha comenzado a sintetizar nanopartículas de fosfatos amorfos, dado que dichas cápsulas son más solubles, y, por ende, mejoraría la disponibilidad de fosfatos.



Figura 2. Caracterización de las nanopartículas de fósforo en microscopio electrónico de barrido.

Potasio

El potasio es uno de los nutrientes más importantes para las plantas y juega un papel fundamental en su crecimiento y desarrollo, ya que está involucrado en procesos como la fotosíntesis, la síntesis de proteínas y la regulación del balance hídrico. Los nanofertilizantes de potasio tienen una serie de ventajas sobre los fertilizantes convencionales, es que pueden ser diseñados para liberar los nutrientes de manera controlada, lo que mejora la eficiencia en el uso. Además, puede ser combinado con otros nutrientes y compuestos para desarrollar productos que sean específicos para las necesidades de un cultivo o una región determinada. Hemos sintetizado fertilizantes potásicos nanoencapsulados, y los mismos han sido probados en cultivos de trigo y maíz en Entre Ríos, en combinación con nanopartículas de fósforo y nitrógeno nano encapsulado.

Calcio

Los fertilizantes inorgánicos que se han utilizado para recuperar suelos resultan de la molienda de roca, y tienen tamaños de partículas grandes en relación a los poros del suelo, que sumado a su muy baja solubilidad sus efectos son poco eficientes. Los nanofertilizantes, en la escala nanométrica, tienen la capacidad de ser incorporados a los microporos y por lo tanto de

manera más eficiente. Nuestro objetivo es contribuir al conocimiento y al desarrollo de capacidades científico-tecnológicas para la producción de nanofertilizantes de calcio para la restauración de suelos.

Estamos trabajando sobre la transformación de materiales convencionales de calcita y yeso con la nanotecnología para proponer alternativas eficientes, económicas y aplicadas a los problemas ocasionados por la acidez, el exceso de aluminio tóxico y los bajos niveles de Ca y Mg en los suelos. Sumado a esto, la compactación puede cambiar la dinámica de reacción de las enmiendas del suelo, especialmente cuando se aplican a la superficie y no se incorporan (SD). La dinámica de Ca y Mg en dicho sistema y el cambio pH pueden ayudar en esta recuperación de los suelos.

Se produjeron nanopartículas a través de métodos químicos de síntesis, utilizando diferentes precursores aniónicos como silicatos, sulfatos y carbonatos, y precursores catiónicos como hidróxido de calcio o magnesio o cloruro de Ca o Mg. Los materiales obtenidos se han caracterizado físicoquímica y ultraestructural. Se evaluará capacidad de restauración de suelos de los productos a partir de ensayos, y se evaluará el efecto en el crecimiento vegetal. Esperamos poder generar producto para ser probado los suelos agrícolas de Argentina y Brasil de manera de poder validar su uso en el Mercosur.

Azufre

El azufre tiene una sinergia positiva con el nitrógeno que permite incrementar los rendimientos de los cultivos. Se han realizado

nanopartículas de azufre para actuar como carriers de nitrógeno. También como acompañantes del calcio para la recuperación de suelos.

Se sintetizaron nanopartículas utilizando diferentes precursores como nitrato de calcio, hidróxido de calcio y cloruro de calcio como precursores de calcio y ácido sulfúrico y sulfato de amonio como precursores de azufre. Por otra

parte, se utilizaron diferentes polímeros protectores con el objetivo de obtener nanopartículas más pequeñas. En las imágenes obtenidas por microscopía confocal láser, se observa el efecto de la síntesis, los precursores y los polímeros protectores. Se puede apreciar que hay variaciones muy significativas tanto en la forma, como en el tamaño de las partículas obtenidas.

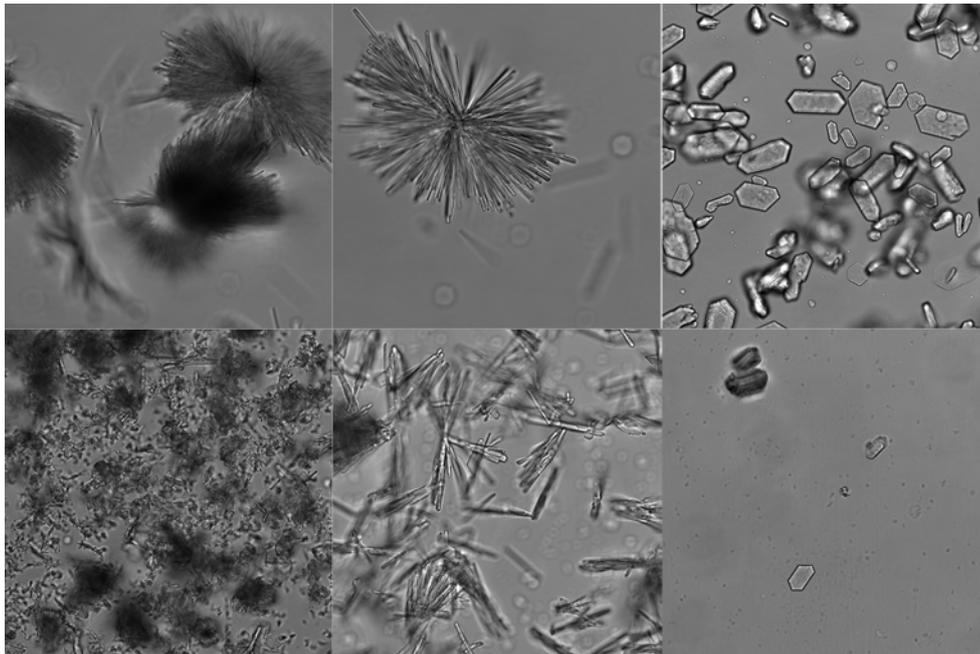


Figura 3. Caracterización de las nanopartículas de azufre en microscopio electrónico de barrido.

Zinc

Para el caso de zinc se sintetizaron nanopartículas de zinc utilizando diferentes polímeros protectores. Como en este caso se pretende utilizar este tipo de fertilizantes para su utilización en semillas, dichos polímeros se adicionan además con el objetivo de que actúen como material adherente, ya que los mismos son compatibles con la semilla. Se evaluó el tamaño de partícula obtenido y su adherencia a las semillas.

Actualmente se están realizando pruebas de zinc como elemento para incorporar a semilla y foliar. Se están probando 3 formulaciones y en distintos ambientes de fósforo. Se espera poder desarrollar un producto de alta concentración de

zinc que permita incorporar toda la demanda del cultivo en la semilla.

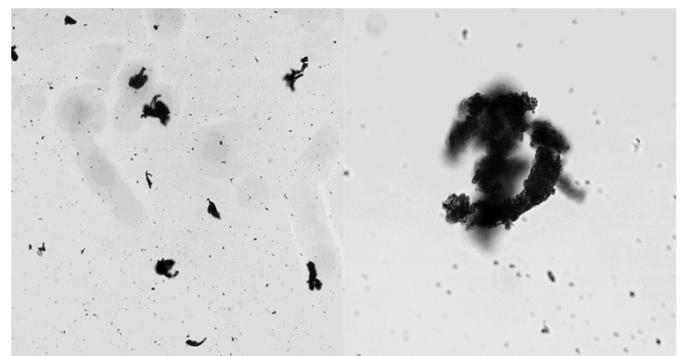


Figura 4: A la izquierda, óxido de zinc nanoparticulado. A la derecha, conglomerado de nanopartículas formado por el agregado de polímeros.



Figura 5. Pruebas de nanopartículas de zinc a semilla en el cultivo de trigo.

Molibdeno

De la misma manera en que se estudiaron las nanopartículas de zinc, se realizó el estudio en nanopartículas de óxido de molibdeno. En las imágenes de microscopía se observa como el polímero recubre la nanopartícula, otorgándole propiedades adherentes en el caso en que se aplique en forma foliar o se utilice en semilla,

como minimizando el tamaño de partícula obtenida en la síntesis, evitando la aglomeración de las nanopartículas. Actualmente nos encontramos trabajando en las concentraciones óptimas de polímero que minimicen el tamaño de la nanopartícula. Por otra parte, se evaluará cual es el efecto del tamaño de partícula en el fertilizante cuando se aplica de manera foliar.

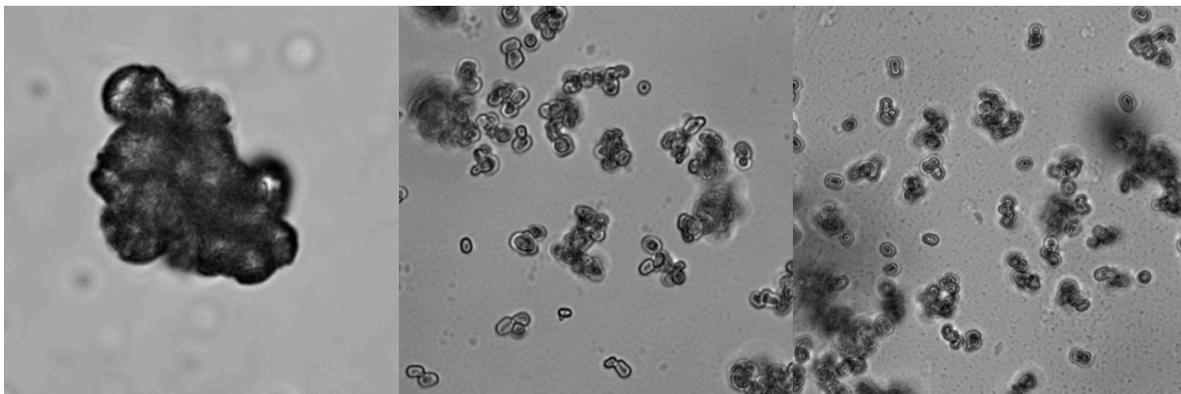


Figura 6: La primera imagen muestra una partícula formada sin el agregado de polímeros, mientras que en la segunda y tercera imagen se observa como el polímero rodea la partícula obtenida.

Capacidades

En el grupo de trabajo hemos trabajado durante 4 años, logrando varios financiamientos, en el que se incluye uno para la construcción de una planta piloto (reactor 500 lts) para la producción de nano-fertilizantes. Esto permitirá realizar ensayos a gran escala (varias hectáreas) que permitan validar los resultados obtenidos en escala piloto (parcela). Es importante destacar que las materias primas utilizadas en todos los casos para la producción de los nano-

fertilizantes, han sido siempre procurando que sean de fácil acceso y se consigan a gran escala. También, los desarrollos se realizaron con procesos muy sencillos y que no requieren gastos en equipamientos complejos para la producción tanto en pequeña como en gran escala. Finalmente, y muy importante, es que los procesos de síntesis de las nanopartículas se han pensado para no generar efluentes peligrosos, lo cual le da al ciclo de producción-uso características amigables con el medio ambiente.

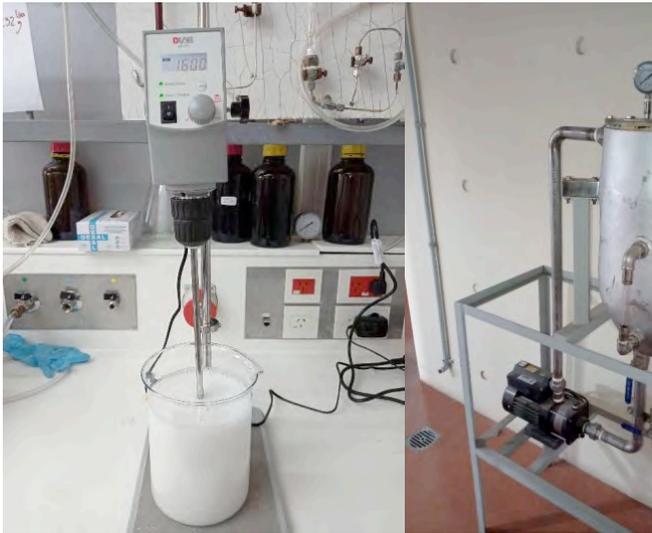


Figura 7. Reactores utilizados para la producción de nano-partículas.

Tabla: estado de evolución de los nano-fertilizantes según los objetivos específicos.

Etapa		N	P	K	S	Ca	Zn	B	Mo
1.	Investigación	x	x	x	x	x	x	x	x
2.	Desarrollo	x	x	x	x	x	x		x
3.	Evaluación	x		x			x		
4.	Comparación	x							

Conclusión

En este trabajo describimos las capacidades locales adquiridas para la síntesis, caracterización y desarrollo de nano-fertilizantes. Cada uno está en distintas etapas, a continuación, una tabla resumen sobre el estado de evolución de los nano-fertilizantes según los objetivos específicos planteados.

La nutrición de cultivos y su efecto sobre los riesgos de producción: análisis de un experimento de largo plazo en la región pampeana

Manenti, L.^{1,2,*}, García, F.O.³, Rubio, G.^{1,2}

¹INBA CONICET UBA, Facultad de Agronomía, Av. San Martín 4453 (1417DSE) Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

²Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, UBA, Av. San Martín 4453 (1417DSE) Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

³Facultad de Ciencias Agrarias, Balcarce, Universidad de Mar del Plata.

Introducción

Los experimentos de largo plazo en nutrición de cultivos brindan oportunidades únicas para indagar los efectos del suministro de nutrientes en las dimensiones biológicas, biogeoquímicas y ambientales para la sostenibilidad agrícola (Rasmussen et al., 1998, Berzsenyi et al., 2000). Permiten monitorear los cambios en el rendimiento de cultivos, el equilibrio de nutrientes en el tiempo, evaluar el impacto en diferentes escenarios de manejo, determinar niveles críticos y brindar información valiosa sobre el complejo suelo-planta. Numerosos estudios de largo plazo han demostrado efectos claros de la fertilización mineral y orgánica, sistemas de labranza, rotación de cultivos y cultivos de servicio en los parámetros del suelo, como cambios en el carbono orgánico, el nitrógeno y los parámetros microbianos que contribuyen a mejorar la calidad de un suelo (por ejemplo, Calegari et al., 2008; Hungria et al., 2009; Koerschens et al., 2014; Li et al., 2018;). El análisis estadístico de los datos de rendimientos en experimentos de larga duración permite evaluar las interacciones tratamiento × ambiente (año / lugar) y proporcionar una medida del efecto del entorno a lo largo del tiempo sobre la consistencia de los efectos del tratamiento y la vulnerabilidad del sistema del cultivo frente a cambios ambientales (Raun & Westerman, 1993; Peltonen-Sainio et al., 2010; Rusinamhodzi et al., 2011; Nielsen & Vigil, 2018). Por lo tanto, son bienvenidos los estudios de largo plazo que involucren diferentes prácticas agronómicas con un conjunto de datos válidos, representativos y esenciales para evaluaciones

más precisas, importantes para garantizar una producción agrícola sostenible en el futuro.

En Argentina, los cultivos extensivos más difundidos son el maíz, el trigo y la soja (Merlos et al., 2015). La constante necesidad de aumentar la producción de alimentos se enfrenta a la variabilidad climática, uno de los principales factores limitantes del rendimiento de los cultivos (Rao et al., 2019). Un estudio global encontró que las limitaciones climáticas representan aproximadamente un tercio (~32-39%) de la variabilidad del rendimiento mundial de cuatro cultivos principales (maíz, arroz, trigo y soja) (Ray et al. 2015). En los últimos años, y especialmente en el contexto del cambio climático, la resiliencia surge como un concepto clave para conceptualizar la vulnerabilidad de los sistemas agrícolas ante las variaciones de las condiciones ambientales (Douxchamps et al. 2017). La resiliencia se define como la capacidad de los sistemas para adaptarse a los cambios y a las incertidumbres (Meuwissen et al. 2019). Algunos análisis de resiliencia basados en experimentos de largo plazo incluyen la estimación de los riesgos de producción, que puede definirse como la certeza con la que se puede predecir el rendimiento de los cultivos (Macholdt et al. 2019 a, b). Una de las aplicaciones de este enfoque es la estimación de la probabilidad de que el rendimiento de un sistema de cultivo caiga por debajo de un determinado nivel crítico o umbral (Eskridge 1990). Es importante dilucidar cómo las diferentes variantes de fertilización afectan a la adaptabilidad ambiental de los cultivos para evaluar su eficacia como estrategia para

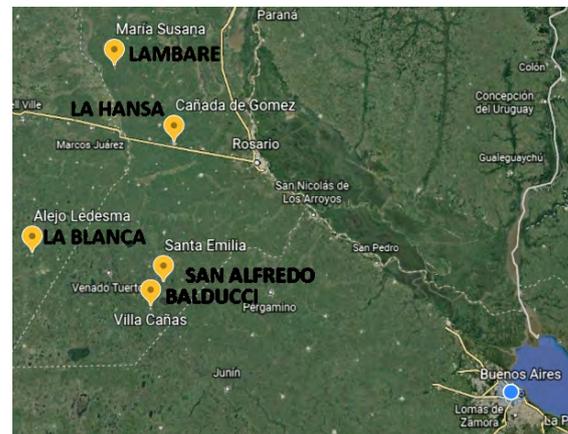
minimizar las fluctuaciones de rendimiento y responder a los cambios ambientales (Hatfield et al. 2001; Zhou et al. 2011; Khan et al. 2020). Al comparar esta probabilidad entre diferentes cultivos o prácticas agronómicas, es posible elegir entre diferentes intervenciones para mitigar los efectos del riesgo y fomentar la resiliencia. Las mejoras a largo plazo en la calidad del suelo podrían proporcionar resiliencia del agroecosistema a las condiciones ambientales y consecuentemente una gran performance de los cultivos. El objetivo de este trabajo fue comparar los efectos de la nutrición de cultivos sobre los riesgos de producción en maíz, trigo y soja.

Materiales y métodos

Las evaluaciones se centraron en la red de nutrición de largo plazo que están llevando a cabo en la Región Pampeana Norte desde el año 2000 los grupos CREA Sur de Santa Fe, con el apoyo del IPNI y Nutrien Ag Solutions™ (Ciampitti et al. 2011; Sucunza et al. 2018; Vega et al. 2020). La red incluye actualmente cinco sitios, dos (Balducchi y San Alfredo) con rotaciones bianuales maíz-trigo/soja de segunda (soja II) y tres (La Blanca, La Hansa y Lambaré) con rotaciones trianuales maíz – soja de primera (soja I) – trigo/soja de segunda (soja II). Los cinco sitios se manejan siguiendo prácticas de siembra directa y sus suelos pertenecen al orden Molisol, con algunas diferencias en sus principales características. El manejo general del cultivo (control de malezas, protección de cultivo, fecha de siembra, etc.) fue determinado por cada productor siguiendo las prácticas habituales en la zona. Se evaluaron a partir de datos de rendimientos de los 19 años (2000/01 a 2018/19) del experimento de largo plazo, que incluyen 40 campañas de maíz, 36 campañas de trigo, 18 campañas de soja I y 35 campañas de soja II. Los sitios siguieron un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones (excepto San Alfredo, dos repeticiones). Las parcelas tenían 25-30 m de ancho y 65-70 m de largo. Se compararon cinco

tratamientos: (a) un control sin fertilización (CTRL); (b) fertilización con P y S (+PS); (c) fertilización con N y S (+NS), (d) fertilización con N y P (+NP), y (e) fertilización con N, P, S (+NPS). El rango de dosis anuales aplicadas durante el periodo evaluado ($\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) fue de 20-46 para el P, 17-25 para el S y 90-175 para el N. Los tratamientos de nutrición de cultivos se repitieron anualmente en las mismas parcelas. No se aplicó N a la soja. En el caso de trigo/soja II, los tratamientos nutricionales se aplicaron sólo al trigo. Los demás nutrientes no suelen limitar el rendimiento en estos suelos y, por tanto, no se aplicaron.

Figura 1. Sitios experimentales, Región Pampeana Norte



El riesgo de producción se ha calculado a través de la probabilidad [en %] de que los rendimientos de los distintos tratamientos caigan por debajo de un nivel específico, o más bien de un umbral. Esta probabilidad depende tanto de la media como de la varianza del tratamiento específico (Eskridge, 1990). Este índice viene dado por la siguiente ecuación:

$$p(i) = \Phi \left[\frac{\delta - \mu_i}{\sigma_i} \right]$$

Donde δ es el nivel crítico, μ_i es la media y σ_i es la desviación típica del i -ésimo tratamiento y Φ es la función de distribución acumulativa normal estándar (Eskridge, 1990). Nuestros datos analizados presentaban una distribución normal permitiendo así continuar con dicho estudio. El índice se calculó para un amplio rango de niveles críticos para cada tratamiento nutricional

cubriendo todo el periodo experimental (2000-2019). Los niveles críticos se calcularon cada 0,1 t ha⁻¹ considerando un rango de rendimientos de 0 hasta 18 t ha⁻¹ para el maíz, 8 t ha⁻¹ para el trigo y 7 t ha⁻¹ para la soja I y II. Por lo tanto, el riesgo agronómico de las diferentes combinaciones de nutrientes puede ser comparado a través de este índice. Las progresiones de las curvas resultantes (Fig. 2): a la izquierda, con mayor pendiente indica un mayor riesgo de producción (una alta probabilidad de que los rendimientos caigan por debajo de los rendimientos medios cuando el rango de niveles críticos es bajo). Cuanto más a la derecha esté la curva y más gradual sea el aumento de la pendiente, menor será el riesgo de producción para los niveles críticos explorados. Los gráficos de riesgo relativo (Fig. 3) contrastan gráficamente los riesgos agronómicos de producción de un tratamiento de fertilización frente a otro tomado como referencia, en nuestro caso +NPS, para cada cultivo: cuanto más cóncava es la curva, menor es el riesgo de producción del tratamiento de referencia.

Resultados y discusión

En todos los casos, el tratamiento CTRL sin fertilizar presentó el mayor riesgo de producción, con una probabilidad de rendimiento inferior a la media general (representada por las líneas verticales en Fig. 2) de 92, 94, 68 y 80% para el maíz, el trigo, la soja I y la soja II, respectivamente. Para el tratamiento +NPS, estos valores se redujeron al 20, 22, 30 y 33%, respectivamente. Para el maíz, la probabilidad de obtener rendimientos superiores al valor medio mostró una clara dependencia de la fertilización con N, como

indica la ubicación a la izquierda en la Fig. 2 de las funciones de todas las variantes nutricionales que carecen de N (tratamiento CTRL; +PS). La triple combinación +NPS fue el tratamiento con menor riesgo de producción, aunque la doble combinación de N con P o S dio lugar a una reducción adicional del riesgo, lo que sugiere un efecto sinérgico significativo.

En el caso del trigo, las funciones de riesgo para +PS y +NS se solapan entre sí, indicando un efecto similar del N y el P, con una pendiente ascendente relativamente pronunciada en un pequeño rango de rendimientos inferiores. Las progresiones para las combinaciones +NP y +NPS se separaron claramente hacia la derecha y las pendientes de las curvas fueron más graduales, indicando una disminución del riesgo agronómico. El tratamiento +NPS se encontró sistemáticamente a la derecha del +NP, lo que indica los beneficios de incluir S en la fórmula de fertilización. La soja I mostró los efectos más bajos de los tratamientos sobre los riesgos de producción. Las funciones de riesgo de este cultivo mostraron que el CTRL se separó de los cuatro tratamientos que incluían adiciones de nutrientes. Estos cuatro tratamientos presentaron un gran solapamiento de sus funciones. En cuanto a la soja II, todas las progresiones se desplazaron hacia la izquierda en comparación con la soja I, lo que indica un menor potencial de rendimiento y un alto riesgo de que los rendimientos se sitúen en el rango de 2-3 t ha⁻¹. La dispersión de las funciones de los tratamientos nutricionales para la soja II fue mayor que para la soja I, pero notoriamente menor que las del maíz y el trigo. En el caso de la soja II, el mayor efecto se observó con la adición de P y S, pero también se observó cierto descenso del riesgo en respuesta al N.

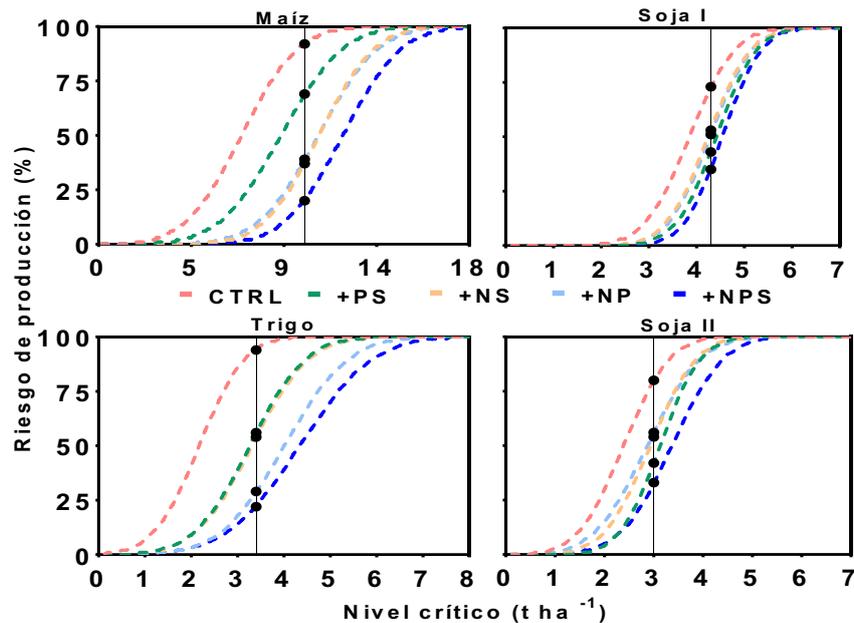


Figura 2. Riesgo de que los rendimientos de maíz, trigo, soja I y soja II caigan por debajo de un nivel crítico de rendimiento según los cinco tratamientos de fertilización. Las líneas verticales indican los rendimientos medios de cada cultivo, mientras que los puntos sobre la línea indican las probabilidades de que el rendimiento del cultivo de un tratamiento determinado sea inferior a la media general. El nombre de los tratamientos representa el símbolo del elemento añadido como nutriente adicional (N= nitrógeno; P= fósforo; S= azufre). El tratamiento control no recibió ningún fertilizante. Datos del experimento de largo plazo CREA Sur de Santa Fe (2000-2019).

Los cuadrantes de riesgo relativo de la Fig. 3 contrastan gráficamente los riesgos agronómicos de producción de un tratamiento frente a otro tomado como referencia, en nuestro caso +NPS. En cada uno de los cuatro cuadrantes de la Fig. 3, se comparó el tratamiento de referencia frente a los tratamientos que carecían de todo o de un solo nutriente específico: CTRL sin fertilización, Sin N (tratamiento +PS); sin P (+NS) y sin S (+NP).

Como era de esperar, el tratamiento +NPS condujo a un riesgo de producción notablemente menor para todos los cultivos, como lo demuestra la fuerte concavidad de las curvas y la posición de todas las funciones por debajo de la línea de riesgo 1:1. La comparación de +NPS frente a CTRL indicó que el trigo y el maíz tuvieron las mayores penalizaciones de rendimiento, mientras que los dos cultivos de soja sufrieron pérdidas no tan grandes como las observadas para el maíz y el trigo (fig. 3). Cuando se comparó +NPS con el tratamiento sin N, el maíz fue más susceptible de sufrir pérdidas de

rendimiento que el trigo, mientras que ambos cultivos de soja sólo se vieron afectados marginalmente (Fig. 3). La ausencia de P (Fig. 3) diferenció dos grupos: el menor riesgo de producción se verificó para el maíz y ambos cultivos de soja (I/II), que presentaron pequeñas diferencias entre ellos. La curva del trigo se mantuvo claramente separada del primer grupo, mostrando una mayor concavidad que indica un mayor riesgo de producción y mayor sensibilidad al déficit del elemento. La ausencia de tratamientos de adición de S (Fig. 3) presentó las funciones del tratamiento más cercanas a la línea de igualdad de riesgo, indicando el menor riesgo relativo de los tres nutrientes y que es el nutriente con menor deficiencia en los suelos del sitio de estudio. Entre los cultivos, el trigo presentó el menor riesgo de pérdida de rendimiento en ausencia de S mientras que, no se observó un patrón claro de diferenciación entre los otros tres cultivos. Esto indica que el trigo fue el cultivo con la menor respuesta relativa al S.

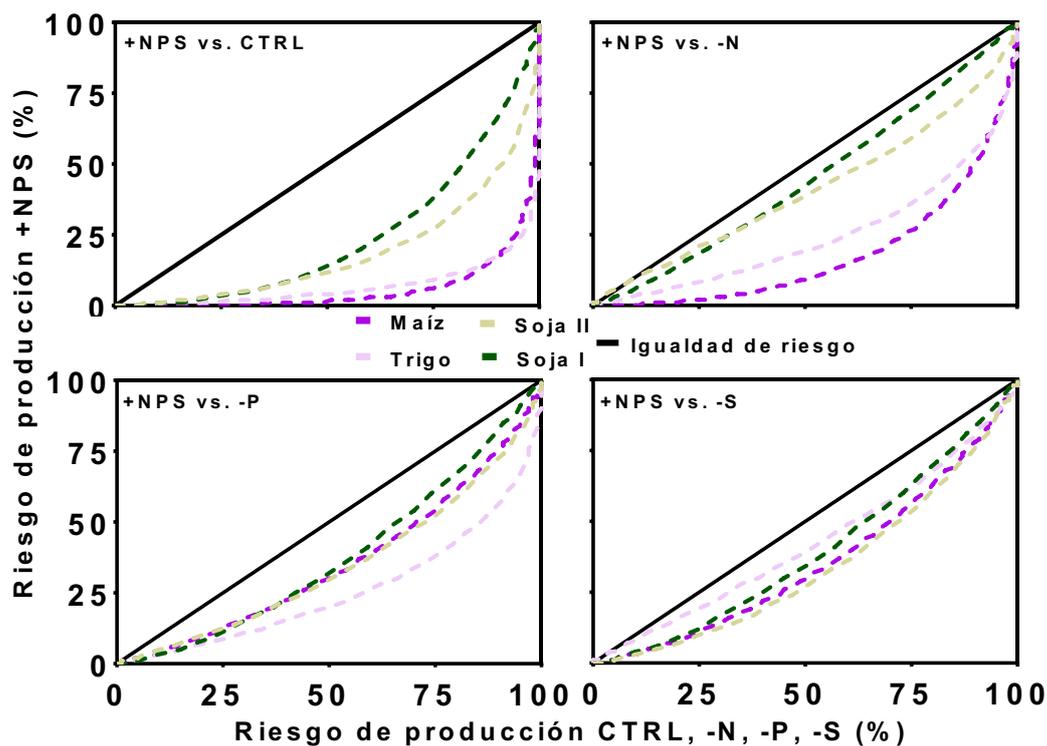


Figura 3. Comparación del riesgo de producción de maíz, trigo, soja I y soja II del tratamiento +NPS (referencia) vs. la ausencia de la fertilización (CTRL) o de un nutriente en particular (-N, -P, -S). El nombre de los tratamientos representa el símbolo del elemento añadido como nutriente adicional (N= Nitrógeno; P= Fósforo; S= Azufre). El tratamiento control no recibió ningún fertilizante. Datos del experimento de largo plazo CREA Sur de Santa Fe (2000-2019).

El N fue el principal nutriente limitante del rendimiento del maíz (Figs. 2, 3). El gráfico de riesgo de producción en maíz indicó que la nutrición sin N (CTRL; +PS) tenían una alta probabilidad de obtener rendimientos más bajos que la media general de 10 t ha⁻¹ mientras que al incluir al N (+NS, +NP, +NPS) reducían drásticamente esos valores. Además, la comparación entre cultivos con riesgo relativo mostró que el maíz era el cultivo con mayor respuesta al N (Fig. 3).

La principal diferencia entre maíz y trigo fue que, aunque ambos cultivos mostraron una alta respuesta al N, en trigo el P apareció como un nutriente limitante de magnitud equivalente al N. Por ejemplo, en los gráficos de riesgo de producción indicaron que la adición individual de N y P tuvo un efecto similar sobre la probabilidad de obtener rendimientos por debajo de la media del estudio (aprox. 50%). Este resultado está en consonancia con reportes

anteriores que indican que el trigo es más sensible a las deficiencias de P que el maíz y, por lo tanto, tiene umbrales críticos de P en análisis del suelo más elevados (Tang et al., 2009; Sucunza et al., 2018).

La soja I fue claramente el cultivo con menor respuesta a los tratamientos de fertilización. Este es un resultado esperado, dada la documentada falta de respuesta al N de esta leguminosa (por ejemplo, Salvagiotti et al., 2008) y su relativamente menor respuesta a la fertilización con P (Fernández et al., 2009; Sucunza et al., 2018). El análisis de riesgo reveló que la soja I tuvo las penalizaciones más bajas en ausencia de cualquier variante de nutrición. En general, en términos de resiliencia este cultivo fue el menos beneficiado por la mejora de la nutrición. Sin embargo, cabe destacar que el tratamiento +NPS fue especialmente importante en los años más desfavorables, contribuyendo así a reducir la variabilidad interanual de los

rendimientos. La soja II fue el cultivo que sufrió las mayores penalizaciones de riesgo por deficiencia de S, como muestra la función de riesgo relativo de la Fig. 3. La razón por la que sólo la soja II respondió positivamente a la adición de S (y no la soja I) podría explicarse a partir de la posición relativa de los dos cultivos en la rotación. La soja de segunda (soja II) se siembra inmediatamente después de la cosecha de trigo mientras que la soja I se siembra después de un período de barbecho de 4-6 meses, posterior a la cosecha de maíz (Caviglia et al., 2004). La ausencia de un período de

barbecho determina que la soja II crezca en un suelo empobrecido en S debido al agotamiento del S del suelo por el trigo y al poco tiempo para reponerlo a través de la mineralización del S orgánico del suelo. Cabe destacar que la mineralización del S orgánico es la principal fuente de S disponible del suelo en suelos pampeanos (Carciochi et al., 2019). Por otro lado, durante los 4-6 meses entre la cosecha de maíz y la siembra de soja I, el suelo permaneció sin cultivar, por lo que sería esperable una reposición del S disponible del suelo a través de la mineralización del S orgánico.

Conclusión

En los planteos agrícolas como los de la Región Pampeana es conveniente aumentar la resiliencia y mitigar los riesgos de producción a través de prácticas agrícolas que satisfagan dos exigencias básicas. En primer lugar, amortiguar la variabilidad interanual de los rendimientos mediante el aumento de los mismos en años desfavorables. En segundo lugar, poder beneficiarse de un mayor potencial ambiental mediante prácticas que permitan obtener mayores rendimientos en condiciones climáticas anuales favorables. En cuanto a la primera demanda, nuestros resultados indicaron que todas las variantes de fertilización fueron una herramienta válida para aumentar los rendimientos de los cultivos estudiados en condiciones desfavorables, lo que implica un importante beneficio en la resiliencia de los sistemas de producción. En cuanto a la segunda demanda, demostramos que el patrón de respuesta a la adición de N, P y S no fue uniforme entre los cultivos comparados, y que cada cultivo presentó su propio patrón a la adición de cada nutriente, como fue detallado en la sección anterior. Dado que en nuestro enfoque de los diferentes cultivos se desarrollaron en las mismas condiciones ambientales (incluida la fertilidad del suelo), nuestros hallazgos pueden utilizarse para extraer pautas que puedan conducir a una mayor resiliencia mediante prácticas de gestión de la nutrición de cultivos.

Agradecimiento

Se agradece a los técnicos que trabajaron en la Red, a los productores, y a IPNI. La financiación del proyecto provino de Nutrien Ag Solutions; ANPCyT, UBA y CONICET.

Bibliografía

- Berzsenyi, Z., Györfly, B., & Lap, D. (2000). Effect of crop rotation and fertilization on maize and wheat yields and yield stability in a long-term experiment. *European Journal of Agronomy*, 13, 225-244. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00076-9](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00076-9).
- Calegari, A., Hargrove, W. L., Rheinheimer, D. D. S., Ralisch, R., Tessier, D., de Tourdonnet, S., & de Fatima Guimarães, M. (2008). Impact of long-term no-tillage and cropping system management on soil organic carbon in an Oxisol: A model for sustainability. *Agronomy Journal*, 100(4), 1013-1019. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0121>
- Carciochi, W. D., Mateos, J., Divito, G. A., Inchauspe, F. M., & Sainz Rozas, H. R. (2019). Sulfur mineralization: A key process for diagnosing its deficiency in wheat. *Soil Science Society of America Journal*, 83, 1553-1563. <https://doi.org/10.2136/sssaj2019.04.0114>
- Caviglia, O. P., Sadras, V. O., & Andrade, F. H. (2004). Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas: I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat-soybean. *Field Crops Research*, 87, 117-129. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.10.002>

- Ciampitti, I.A., Piccone L.I., Garcia, F.O., Rubio, G. (2011). Phosphorus budget and soil extractable dynamics in field crop rotations in Mollisols. *Soil Science Society of America Journal*, 75, 131-142. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0345>
- Douxchamps, S., Debevec, L., Giordano, M., & Barron, J. (2017). Monitoring and evaluation of climate resilience for agricultural development—A review of currently available tools. *World Development Perspectives*, 5, 10-23. <https://doi.org/10.1016/j.wdp.2017.02.001>
- Esckridge, K. M. (1990). Selection of stable cultivars using a safety-first rule. *Crop Science*, 30(2), 369-374. <https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000020025x>
- Fernández, M. C., Belinque, H., Boem, F. G., & Rubio, G. (2009). Compared phosphorus efficiency in soybean, sunflower and maize. *Journal of Plant Nutrition*, 32, 2027-2043. <https://doi.org/10.1080/01904160903308135>
- Hatfield, J. L., & Dold, C. (2019). Water-use efficiency: advances and challenges in a changing climate. *Frontiers in plant science*, 10, 103. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00103>
- Hungria, M., Franchini, J. C., Brandao-Junior, O., Kaschuk, G., & Souza, R. A. (2009). Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experiment with three soil-tillage and two crop-rotation systems. *Applied Soil Ecology*, 42(3), 288-296. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.05.005>
- Khan, S., Anwar, S., Shaobo, Y., Gao, Z., Sun, M., Ashraf, M. Y., ... & Yang, Z. (2020). Soil water consumption, water use efficiency and winter wheat production in response to nitrogen fertilizer and tillage. *PeerJ*, 8, e8892. <https://doi.org/10.7717/peerj.8892>
- Koerschens, M., Albert, E., Baumecker, M., Ellmer, F., Grunert, M., Hoffmann, S., ... & Zorn, W. (2014). Humus and climate change—results of 15 long-term experiments. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60(11), 1485-1517. <https://doi.org/10.1080/03650340.2014.892204>
- Li, J., Wen, Y., Li, X., Li, Y., Yang, X., Lin, Z., ... & Zhao, B. (2018). Soil labile organic carbon fractions and soil organic carbon stocks as affected by long-term organic and mineral fertilization regimes in the North China Plain. *Soil and Tillage Research*, 175, 281-290. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.08.008>
- Macholdt J., Piepho H.-P., Honermeier B. (2019a). Mineral NPK and manure fertilisation affecting the yield stability of winter wheat: Results from a long-term field experiment. *European Journal of Agronomy*, 102, 14-22. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.10.007>
- Macholdt J., Piepho H.-P., Honermeier B. (2019b). Does fertilization impact production risk and yield stability across an entire crop rotation? Insights from a long-term experiment. *Field Crops Research*, 238, 82-92. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.04.014>
- Merlos, F. A., Monzon, J. P., Mercu, J. L., Taboada, M., Andrade, F. H., Hall, A. J., ... & Grassini, P. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research*, 184, 145-154. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.10.001>
- Meuwissen, M. P., Feindt, P. H., Spiegel, A., Termeer, C. J., Mathijs, E., De Mey, Y., et al. (2019). A framework to assess the resilience of farming systems. *Agricultural Systems*, 176, 102656. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2019.102656>
- Nielsen, D. C., & Vigil, M. F. (2018). Wheat yield and yield stability of eight dryland crop rotations. *Agronomy Journal*, 110(2), 594-601. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.07.0407>
- Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L., Trnka, M., Olesen, J. E., Calanca, P., Eckersten, H., ... & Orlandini, S. (2010). Coincidence of variation in yield and climate in Europe. *Agriculture, ecosystems & environment*, 139(4), 483-489. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.09.006>
- Rao C.S., Kareemulla K., Krishnan P., Murthy G., Ramesh P., Ananthan P., Joshi P. (2019). Agro-ecosystem based sustainability indicators for climate resilient agriculture in India: a conceptual framework. *Ecological Indicators*, 105, 621-633. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.038>
- Rasmussen, P. E., Goulding, K. W., Brown, J. R., Grace, P. R., Janzen, H. H., & Korschens, M. (1998). Long-term agroecosystem experiments: assessing agricultural sustainability and global change. *Science*, 282(5390), 893-896. <https://doi.org/10.1126/science.282.5390.89>
- Raun, W. R., Barreto, H. J., & Westerman, R. L. (1993). Use of stability analysis for long-term soil fertility experiments. *Agronomy Journal*, 85(1), 159-167. <https://doi.org/10.2134/agronj1993.00021962008500010029x>
- Ray, D. K., Gerber, J. S., MacDonald, G. K., & West, P. C. (2015). Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nature communications*, 6(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/ncomms6989>
- Rusinamhodzi, L., Corbeels, M., Van Wijk, M. T., Rufino, M. C., Nyamangara, J., & Giller, K. E. (2011).

- A meta-analysis of long-term effects of conservation agriculture on maize grain yield under rain-fed conditions. *Agronomy for sustainable development*, 31, 657-673. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0040-2>
- Salvagiotti, F., Cassman, K. G., Specht, J. E., Walters, D. T., Weiss, A., & Dobermann, A. (2008). Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Research*, 108, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.03.001>
- Sucunza, F.A., Boem, F.H. G., García, F.O., Boxler, M., Rubio, G. (2018). Long-term phosphorus fertilization of wheat, soybean and maize on Mollisols: Soil test trends, critical levels and balances. *European Journal of Agronomy*, 96, 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.03.004>
- Tang, X., Ma, Y., Hao, X., Li, X., Li, J., Huang, S., & Yang, X. (2009). Determining critical values of soil Olsen-P for maize and winter wheat from long-term experiments in China. *Plant and Soil*, 323, 143-151. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9919-y>
- Vega Jara L., Gutierrez Boem F., Garcia F., Rubio G. (2020) Long-term fertilization does not affect soil carbon/nitrogen/sulfur ratios or the proportion between labile and nonlabile fractions in Mollisols. *Soil Science Society of America Journal* 84:798-810. <https://doi.org/10.1002/saj2.20058>
- Zhou, J. B., Wang, C. Y., Zhang, H., Dong, F., Zheng, X. F., Gale, W., & Li, S. X. (2011). Effect of water saving management practices and nitrogen fertilizer rate on crop yield and water use efficiency in a winter wheat–summer maize cropping system. *Field Crops Research*, 122(2), 157-163. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.03.009>

Nutrición en la Rotación: Ensayos de la Región CREA Córdoba Norte

María Lourdes Cornavaca¹, Sofia Pedraza¹, Lucas Feroli², Guido Crisci² y Fernando O. García³

¹CREA Córdoba Norte, ²Nutrien Ag Solutions, ³Consultor-FCA Balcarce

La región Córdoba Norte del movimiento CREA, con el auspicio de Nutrien Ag Solutions, estableció una red de ensayos de nutrición de cultivos de largo plazo en la campaña 2008/09. Estos ensayos se realizan en los mismos sitios y parcelas iniciados en la campaña 2008/09, pero el diseño fue reformulado en la campaña 2014/15. Los objetivos generales de la red son:

1. Determinar respuestas (directas y residuales) de los cultivos dentro de la rotación a la aplicación de nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S) en diferentes ambientes de la región.
2. Evaluar algunas metodologías de diagnóstico de la fertilización nitrogenada, fosfatada y azufrada.
3. Evaluar deficiencias y respuestas potenciales a micronutrientes: boro (B) y zinc (Zn).
4. Conocer la evolución de los suelos bajo distintos esquemas de fertilización determinando índices relacionados con su calidad.

En este escrito se sintetiza la información acumulada en los últimos ocho años de ensayos (campaña 2014/15 a 2021/22 inclusive) en los tres sitios que se continúan a la fecha: Colonia Almada, Piquillín y Totoral.

En la **Tabla 1** se indican las características de los tres sitios de evaluación y en la **Tabla 2** se

Materiales y métodos

La red de ensayos en campos de productores de la Región CREA Córdoba Norte comenzó en la campaña 2008/09 con la evaluación de nueve tratamientos hasta la campaña 2013/14. A partir de la campaña 2014/15 se reformularon los tratamientos en los mismos sitios reduciéndose a seis por ensayo. Los sitios que se continúan a la fecha son los de Totoral, Piquillín y Colonia Almada (inicio 2014/15) (**Figura 1**).

Figura 1. Ubicación geográfica de los tres ensayos de nutrición de cultivos de la Región CREA Córdoba Norte



describen los cultivos realizados en las últimas 8 campañas.

Tabla 1. Información de los sitios de los ensayos Nutrición en la Rotación de la Región CREA Córdoba Norte. Campaña 2021/22.

Sitio	Colonia Almada	Piquillín	Totoral
CREA	Laguna Larga	Río I	Totoral
Zona Agroecológica	Zona 2	Zona 1	Zona 1
Serie Suelos	Oncativo	MNtc-7	MNen-57
Tipo suelo	Haplustol éntico	Haplustol típico	Haplustol éntico y típico
Textura	Franco limoso	Limoso fino	Limoso fino
Años de Agricultura a 2021	22	27	22
Rotación propuesta	S-T/M-T/S	M-S-T/S	M-S

Tabla 2. Cultivos evaluados en los tres sitios de los ensayos Nutrición en la Rotación de la Región CREA Córdoba Norte. Campañas 2014/15 a 2021/22.

Sitio	C. Almada	Piquillín	Totoral
2014/15	Maíz	Trigo/Soja	Soja
2015/16	Trigo/Soja	Soja	Maíz
2016/17	Maíz	Maíz	Soja
2017/18	Soja	Soja	Maíz
2018/19	Maíz	Garbanzo/Maíz	Soja
2019/20	Soja	Soja	Maíz
2020/21	Maíz	Maíz	Soja
2021/22	Soja	Soja	Maíz

Los tratamientos evaluados se indican en la **Tabla 3**, los cuales se establecen siempre sobre las mismas parcelas. Las dosis de N en maíz se definen según información zonal. Los cultivos de soja no se fertilizan con N. Las dosis de P y S se determinan para reponer el equivalente a la extracción en grano más un 5-10% extra en concepto de construcción de fertilidad. Las dosis de B y Zn en el tratamiento Completo son de suficiencia.

Las fuentes utilizadas son urea (fuente de N), fosfato monoamónico (fuente de P), yeso granulado (fuente de S), y distintos fertilizantes sólidos como fuente de micronutrientes.

En todos los casos se utiliza un diseño en bloques completos al azar con dos repeticiones. El tamaño de las parcelas es de

aproximadamente 20 m de ancho x 250 m de largo. Todas las prácticas de manejo del cultivo (siembra, fertilización, manejo de adversidades, etc.) se realizan con maquinaria de los productores. La cosecha de granos se realiza con maquinaria del productor y se estandariza a humedad de recibo.

A la siembra de los cultivos, se tomaron muestras compuestas de suelo en tratamientos selectos para el análisis de materia orgánica (MO), N mineralizable (Nan), P Bray, S-SO₄⁻², boro (B) y zinc (Zn) en los primeros 20 cm, y N-NO₃⁻ en los primeros 60 cm del perfil. En cada establecimiento se registraron las precipitaciones mensuales durante el ciclo de los cultivos. En la **Tabla 4** se indican las lluvias de 2014 a mediados de 2022.

Tabla 3. Tratamientos de fertilización de los ensayos Nutrición en la Rotación de la Región CREA Córdoba Norte. Las fuentes de fertilizante utilizadas fueron urea (46-0-0), fosfato monoamónico (11-22-0), yeso azufertil (0-0-0-19S), B10 y Zn 40.

Tratamiento	N	P	S	Zn	B
	Dosis de Nutrientes (kg/ha)				
Soja					
Testigo	0	0	0	0	0
PS	0	25	15	0	0
NS	0	0	15	0	0
NP	0	25	0	0	0
NPS	0	25	15	0	0
NPSZnB	0	25	15	0.5	1
Trigo y Maíz					
Testigo	0	0	0	0	0
PS	0	25	15	0	0
NS	100	0	15	0	0
NP	100	25	0	0	0
NPS	100	25	15	0	0
NPSZnB	100	25	15	1	0.5

Tabla 4. Precipitaciones mensuales (mm) registradas en los tres sitios de los ensayos Nutrición en la Rotación de la Región CREA Córdoba Norte. Enero 2014 a mayo 2022 inclusive.

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Colonia Almada												
2014	80	227	137	86	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd
2015	113	149	195	19	5	2	6	29	12	28	62	22
2016	89	276	52	174	SD	60	5	1	3	50	21	124
2017	168	55	155	47	23	23	20	4	75	76	66	134
2018	75	72	0	63	95	1	3	3	34	76	218	81
2019	81	57	101	122	19	3	2			47	20	118
2020	32	53	93	27					15	12	36	46
2021	95	67	110	sd	18	sd	3	1	25	100	122	50
2022	65	35	125	25	15	4						
Piquillín												
2014	58	186	131	76	12	0	5	0	18	48	66	72
2015	158	416	146	55	8	0	5	28	9	16	55	59
2016	61	196	60	158	12	47	4	1	3	60	94	115
2017	75	167	69	28	39	14	2	5	71	58	13	105
2018	92	69	1	43	114	4	0	0	10	34	104	45
2019	210	51	45	0	0	0	0	0	0	46	167	118
2020	47	274	17	10	0	0	0	0	10	32	53	109
2021	150	52	98	25	9	10	0	0	16	48	157	38
2022	97	42	90	13	5							
Totoral												
2014	60	116	71	100	30	0	5	19	0	24	80	37
2015	129	87	81	71	29	0	5	22	0	24	108	66
2016	125	87	83	89	18	29	1	0	0	88	58	136
2017	138	117	89	38	18	9	2	1	44	37	37	97
2018	94	44	1	49	100	25	0	0	39	73	30	42
2019	210	51	45	0	0	0	0	0	0	46	167	118
2020	47	274	17	10	0	0	0	0	10	32	53	109
2021	150	52	98	25	9	10	0	0	2	25	112	35
2022	117	34	114	5	0	0						
Histórico Jesús María	127	106	110	56	26	11	9	11	31	69	103	121

sd, sin datos.

Análisis compilado 2014/15 a 2021/22

Rendimientos y respuestas a la fertilización

Los rendimientos promedio de maíz y soja entre 2014/15 y 2021/22 en los sitios de Colonia

Almada, Piquillín y Totoral muestran respuestas a la fertilización en maíz, pero muy reducidas en soja (Figura 2). Las mayores respuestas fueron de 30%, 9% y 16% a NPS en C. Almada y a NP en Piquillín y Totoral, respectivamente. En soja, las respuestas fueron de 4% a NS y PS en C. Almada y Piquillín, respectivamente.

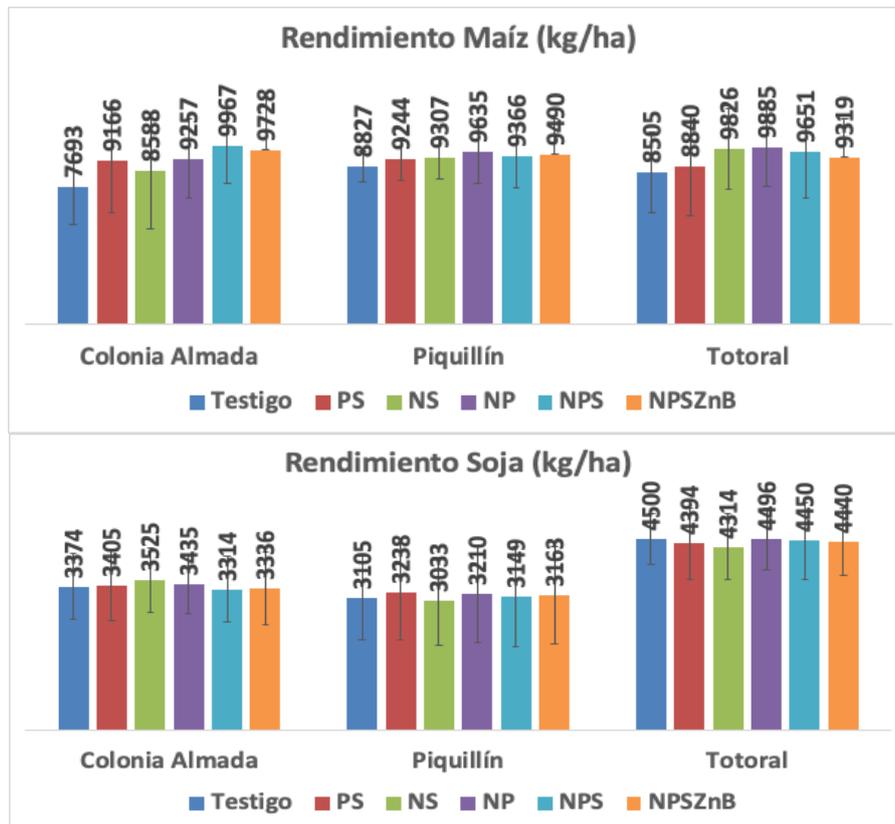


Figura 2. Rendimientos promedio de maíz y soja para los seis tratamientos en los tres sitios experimentales evaluados entre 2014/15 y 2021/22. En maíz se evaluaron 3, 3 y 4 campañas para C. Almada, Piquillín y Totoral, respectivamente, y en soja 4 campañas en cada sitio. Las barras verticales muestran los desvíos estándar de los promedios. Ensayos Nutrición en la Rotación de la Región CREA Córdoba Norte.

La **Figura 3** muestra la distribución de rendimientos observados entre 2014/15 y 2020/21 por sitio y tratamiento (promedios de dos repeticiones) para maíz (13 sitios) y soja (18 sitios). En maíz, para rendimientos menores de 8000 kg/ha, la respuesta más destacada es a N con diferencias de aproximadamente 1300-1700 kg/ha entre tratamientos sin y con aplicación de N. Para los rendimientos superiores a 8000 kg/ha, las

respuestas son generales a todos los tratamientos de fertilización, con diferencias de aproximadamente 1200-1400 kg/ha sobre el tratamiento Testigo. En el caso de soja, las diferencias entre tratamientos son muy bajas y solo se observan diferencias de aproximadamente 200 kg/ha en niveles de rendimiento superiores a 4000 kg/ha.

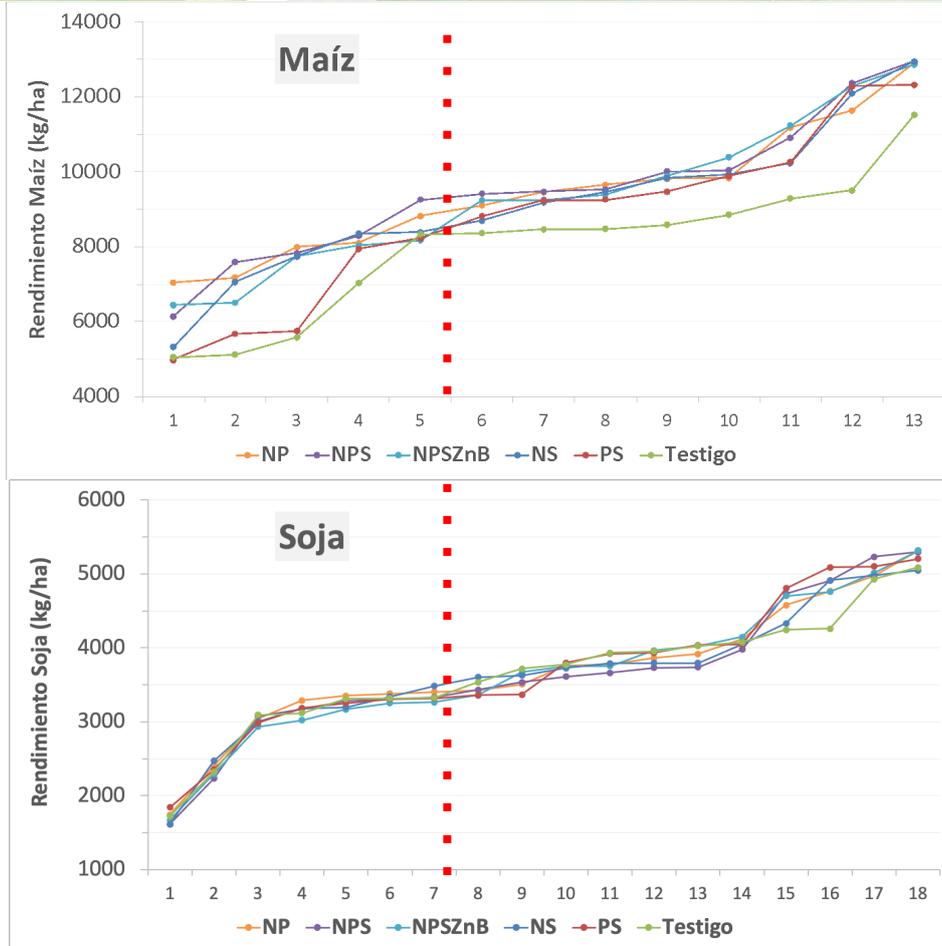


Figura 3. Distribución de rendimientos según sitio y tratamiento para maíz y soja (promedios de 2 repeticiones por tratamiento). La línea roja punteada vertical indica el 50% de los sitios (mediana): rendimientos de 8469 y 9473 kg/ha para Testigo y NPS en maíz, respectivamente; y 3748 y 3573 kg/ha para Testigo y NPS en soja, respectivamente. Ensayos Nutrición en la Rotación de la Región CREA Córdoba Norte. Campañas 2014/15 a 2021/22. Incluye 2 sitios de maíz 2^a y 2 sitios de soja 2^a.

Las **respuestas a N** en maíz se relacionaron con los análisis de N-nitrato a la siembra + fertilizante o Ns+f (N suelo 0-60 cm + N aplicado como fertilizante), pero esta relación presenta una correlación baja ($R^2=0.22$) (**Figura 4 superior**). Recientemente, Correndo et al. (2021) mostraron que el umbral crítico de Ns+f depende del nivel de rendimiento del cultivo de maíz. La **Figura 4 inferior** muestra la relación observada por Correndo et al. (2021) y en la misma figura se han incluido las observaciones de los trece ensayos de esta red. Los datos de CREA Córdoba Norte se ajustan parcialmente a las distintas curvas ajustadas a

nivel de región pampeana, por lo cual en principio podrían usarse los umbrales críticos propuestos por Correndo et al. (2021) para los distintos niveles de rendimiento objetivo. Sin embargo, hay varios casos de esta red que muestran niveles mayores de rendimiento a los esperados según el nivel de Ns+f. Esta situación estaría indicando un mayor aporte de N por mineralización durante el ciclo del cultivo, la cual podría ser estimada por indicadores como, por ejemplo, el N anaeróbico o Nan (N mineralizado en una incubación anaeróbica a temperatura óptima durante 7 días).

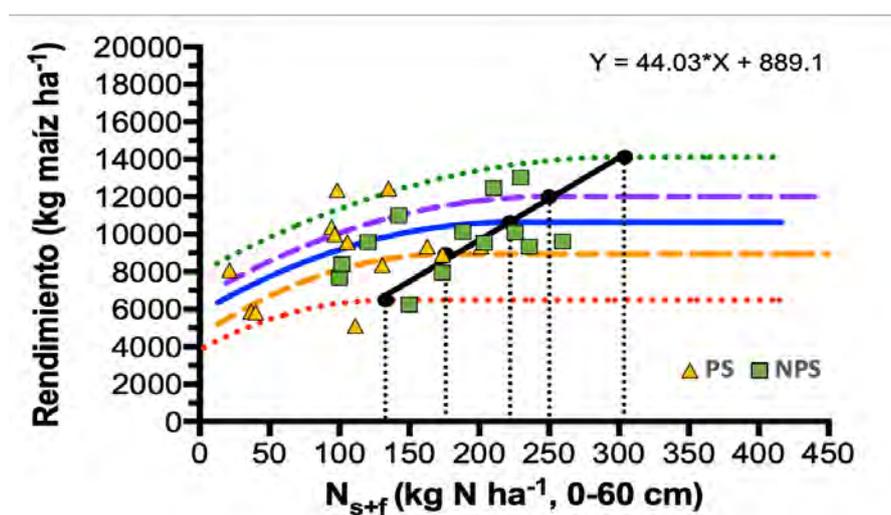
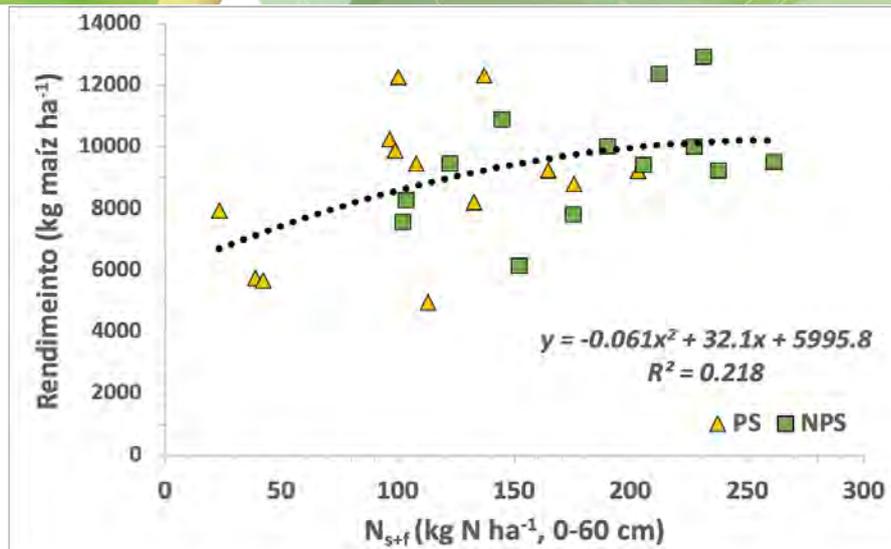


Figura 4. Relación entre rendimientos de maíz y disponibilidad de N a la siembra (N-nitratos a 0-60 cm + N fertilizante) para los trece sitios de la red Nutrición en la Rotación CREA Córdoba Norte 2014-2021 (superior) y para distintos niveles de rendimiento según Correndo et al. (2021).

La mineralización de N promedio estimada a partir del rendimiento de los tratamientos PS es de 153 kg N/ha (DS 69 kg N/ha) (Figura 5). Sumando el promedio de 105 kg Ns a la siembra, la oferta del sistema de 258 kg N/ha podría cubrir los requerimientos de N para 8500-9000 kg/ha de maíz. Debe considerarse que estos valores son promedios y que se observó una gran variabilidad entre sitios y campañas.

Las eficiencias de uso de N (EUN = (Rendimiento NPS - Rendimiento PS) / Dosis de N aplicada) fueron muy variables con rango

de -7 a 76 kg maíz por kg de N aplicado (Figura 5). La productividad parcial de N aplicado (PPFN = Rendimiento NPS/dosis de N aplicado) también fue variable, rango de 95 a 259 kg maíz por kg N, y muy superior a los valores de referencia de literatura de 60-80 kg maíz por kg N aplicado (Figura 5). La variabilidad de EUN y PPFN y los altos valores de PPFN reflejan la variabilidad en oferta de N del sistema y la necesidad de mejorar los modelos de N, probablemente utilizando herramientas de diagnóstico que permitan evaluar el aporte de N por mineralización como se indicó en párrafos anteriores.

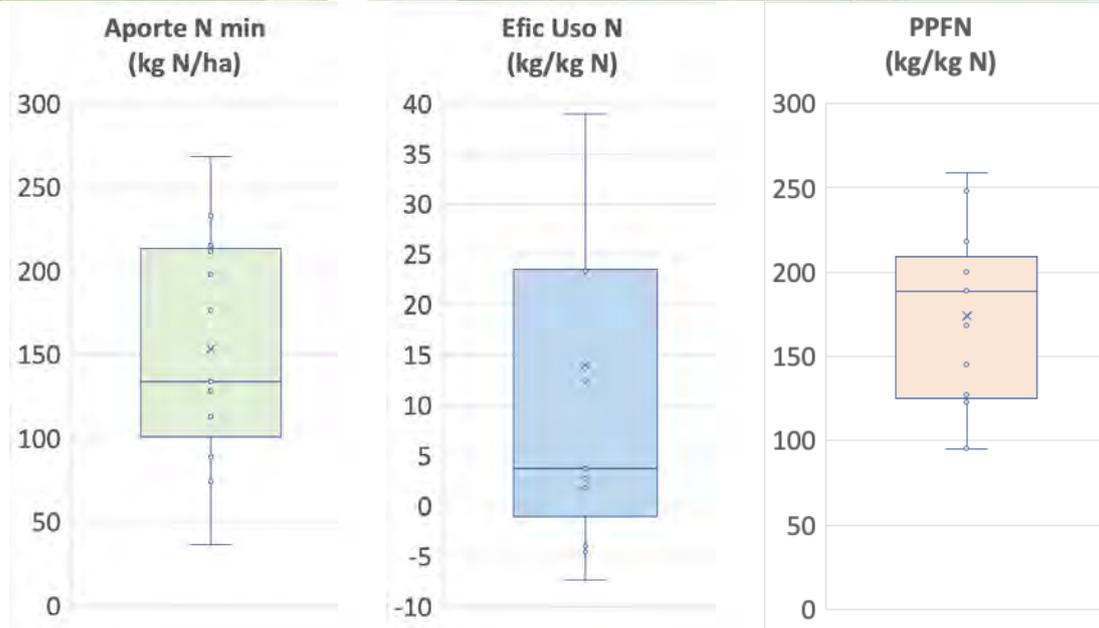


Figura 5. Estimaciones de aporte de N por mineralización (izquierda), de eficiencia de uso del N aplicado (centro) y de productividad parcial de N aplicado (derecha) en los trece ensayos de maíz de la red Nutrición en la Rotación CREA Córdoba Norte 2014-2021.

En el caso de P, la relación que se ha ajustado es la de rendimiento relativo (rendimiento sin P/rendimiento con P) con el nivel de P Bray (0-20 cm) (Correndo et al., 2018). Los datos de CREA Córdoba Norte se ajustan a las curvas regionales para maíz (Figura 6) y para soja (Figura 7). Las respuestas a P o interacciones de P con N o S se registraron mayormente en los sitios con menor nivel de P Bray de la red como C. Almada, o que cayeron a través de los años como Piquillín y Sarmiento. Con estas observaciones, debería buscarse mantener los niveles de P Bray por arriba de las 20 ppm o, en los suelos con niveles menores, aumentar el P Bray a valores de 20 - 25 ppm aplicando cantidades de P superiores a la remoción de P en grano (balances positivos de P, aplicación > remoción). Más adelante se discute la evolución de P Bray en estos ensayos.

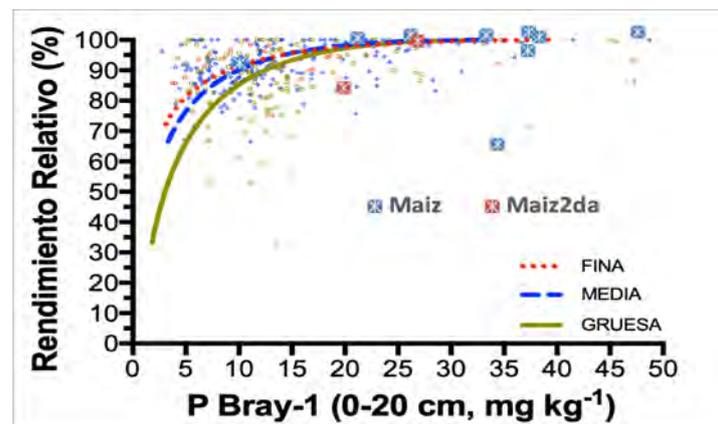


Figura 6. Relación entre rendimientos relativos de maíz (Rendimiento sin P/Rendimiento con P) y nivel de P Bray a 0-20 cm para suelos de distintas texturas según Correndo et al. (2018), y relaciones observadas en los once sitios de maíz 1ra. y dos de maíz 2da. (puntos según leyenda en la figura) de los ensayos Nutrición en la Rotación de la Región CREA Córdoba Norte.

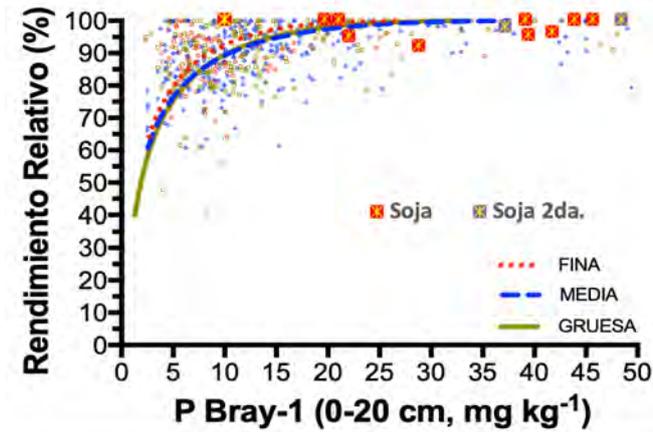


Figura 7. Relación entre rendimientos relativos de soja (Rendimiento sin P/Rendimiento con P) y nivel de P Bray a 0-20 cm para suelos de distintas texturas según Correndo et al. (2018), y relaciones observadas en los quince sitios de soja 1ra. y dos de soja 2da. (puntos según leyenda en la figura) de los ensayos Nutrición en la Rotación de la Región CREA Córdoba Norte.

En el caso de S, los umbrales críticos de 8-10 ppm, mencionados en otras redes de ensayos en región pampeana, no son muy confiables y siempre se sugiere sumar criterios como los de cantidad y calidad de materia orgánica, presencia de napa, etc. En esta red, se observa una tendencia de mayor frecuencia de respuesta a S en sitios con rendimientos de maíz superiores a los 8000 kg/ha. La respuesta es moderada, de aproximadamente 250 kg/ha, probablemente a partir del buen aporte por mineralización de S orgánico del suelo y, en general, en interacción con N y/o P.

Fertilización y eficiencia de uso del agua

Las respuestas a la fertilización en maíz permitieron incrementar la **eficiencia de uso del agua (EUA)** (Figura 8). La Figura 9 muestra la relación entre los rendimientos de maíz de los tratamientos Testigo y NPS y el abastecimiento de agua (precipitaciones durante el ciclo más 150/200 mm de agua almacenada en el suelo a la siembra, 150 mm para maíz 2da. y 200 mm para maíz 1ra.). La línea negra de la figura muestra la función de frontera propuesta por van Ittersum et al. (2013) para cereales, que indica una eficiencia de referencia de 22 kg/ha de maíz o trigo por mm de agua disponible. Muchos de los ensayos evaluados se ubican con EUA cercanas al óptimo. En promedio para todos los maíces (1ra. y 2da.), el Testigo alcanzó 19.6 kg/mm y

el NPS 22.9 kg/mm, una diferencia del 17% en EUA. En el caso de soja, las EUA no se diferenciaron entre tratamientos y variaron entre 5.0 y 5.1 kg/mm (Figura 8). En sistemas de alta EUA se han observado valores de 10-12 kg de soja por mm.

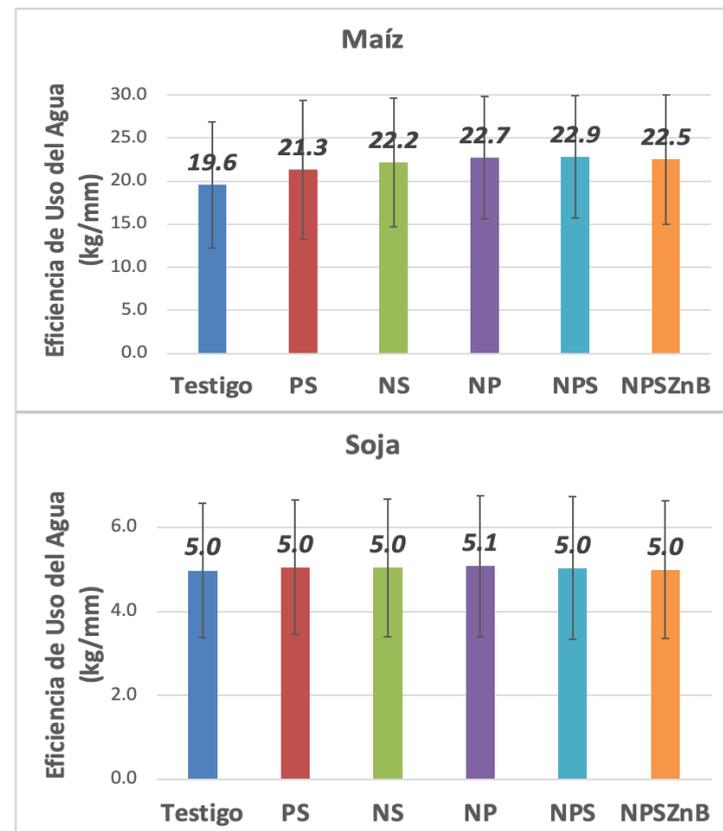


Figura 8. Eficiencia de uso de agua (EUA) promedio por tratamiento para maíz y soja. Ensayos Nutrición en la Rotación de la Región CREA Córdoba Norte. Campañas 2014/15 a 2021/22.

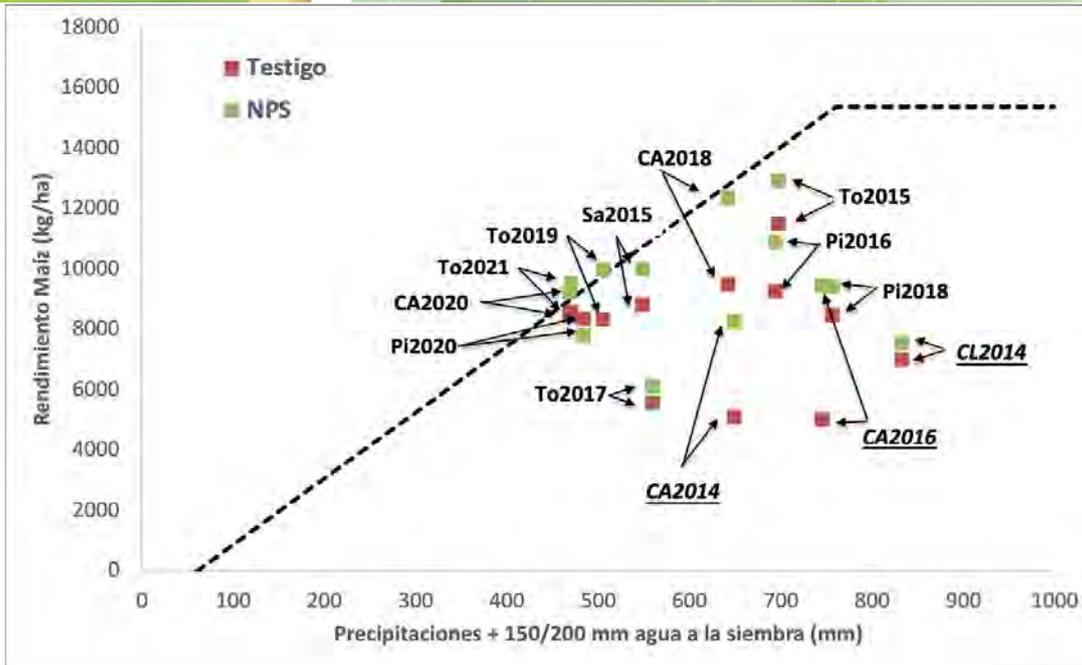


Figura 9. Relación entre rendimientos de maíz 1ra. (fuente normal) y 2da. (fuente itálica y subrayado) de tratamientos Testigo y NPS con el abastecimiento de agua (precipitaciones durante el ciclo más 200 y 150 mm de agua almacenada en el suelo a la siembra de maíz 1ra y maíz 2da., respectivamente). La línea negra punteada muestra la función de frontera propuesta por van Ittersum et al. (2013) para cereales. CL es Cañada de Luque, CA es C. Almada, Pi es Piquillín, Sa es Sarmiento y To es Totoral.

Las respuestas a NPS no se relacionaron con las precipitaciones totales durante el ciclo de maíz y de soja (Figura 10) y tampoco se

observaron diferencias sustanciales en la respuesta a NPS en maíz según sean campañas de años Niña o Niño (Figura 11).

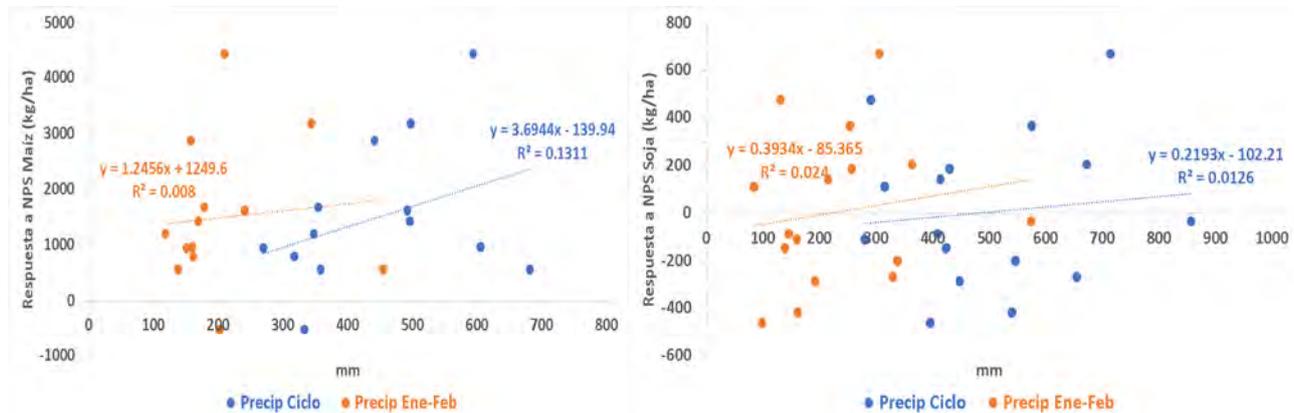


Figura 10. Relaciones de respuesta promedio a NPS con precipitaciones totales del ciclo y precipitaciones enero-febrero para maíz (superior) y para soja (inferior). Nutrición en la Rotación. CREA Córdoba Norte, 2014/15 a 2021/22 inclusive.

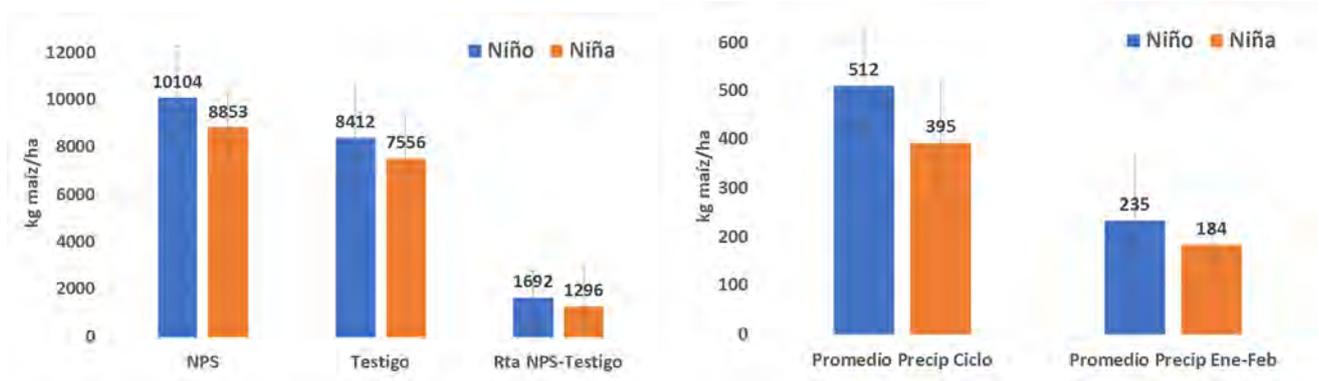


Figura 11. Rendimientos promedio de maíz en tratamientos Testigo y NPS (superior) y respuesta promedio a NPS (inferior) en años Niño y años Niña. Niño: 2014/15, 2015/16, 2018/19; Niña: 2016/17, 2017/18, 2020/21, 2021,22. Nutrición en la Rotación. CREA Córdoba Norte, 2014/15 a 2021/22 inclusive.

Evolución de análisis del suelo y balances de nutrientes

La **Tabla 5** muestra análisis de suelo al inicio de los ensayos, 2008 para Piquillín y Totoral y 2014 para Colonia Almada, y en pre-siembra de la campaña 2022.

Los valores de materia orgánica (MO) son representativos de los observados en suelos agrícolas de las subzonas de la región, pueden considerarse bajos (Colonia Almada, Totoral) a medios (Piquillín). Los niveles de P Bray fueron altos en los 3 sitios al inicio de los ensayos. Las concentraciones de S-sulfato han sido muy variables en estos análisis.

Los pH son representativos de la zona. Los valores de capacidad de intercambio catiónico (CIC) se ajustan a las texturas de suelo de cada sitio. Las saturaciones de cationes son elevadas y han permanecido en altos niveles luego de los 14 u 8 años de ensayos.

Entre los micronutrientes, los valores son bajos en zinc (Zn) y se observa el efecto residual de aplicación en los tratamientos con aplicación de este nutriente en los 3 sitios. Los niveles de boro (B) y cobre (Cu) son medios a bajos.

A través de ocho años de evaluación, los niveles de P Bray fueron disminuyendo en el tratamiento NS y subiendo moderadamente en el tratamiento NPS (**Figura 10**). Estas tendencias se deben a los balances de P negativos en el tratamiento NS y positivos en el tratamiento NPS (**Figura 11**). La **Figura 12** muestra la relación entre cambios en P Bray y balances de P. En los tratamientos NS (sin aplicación de P), el P Bray disminuye 0.16 ppm por cada kg de balance negativo de P o, en otras palabras, el P Bray cae 1 ppm cada 6.2 kg de balance negativo de P.

Tabla 5. Análisis de suelos selectos, según año y tratamiento, de los tres sitios de la red Nutrición en la Rotación. CREA Córdoba Norte.

Año/Tratamiento	MO	P Bray	pH	N-nitrato	S-sulfato	CIC	Ca	Mg	K	Na	Sat. bases	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	%	ppm		kg/ha	ppm		cmol/kg				%	ppm				
Colonia Almada																
2014		34.0			2.2											
2022 Testigo	2.0	27.5	7.4		11.3	18.9	13.0	2.4	1.8	0.3	92%	1.5	0.9	12.9	13.0	0.4
2022 PS	2.4			51												
2022 NS		39.5														
2022 NPS					13.9											
2022 NPS	2.7	74.5	7.4	75	21.5	19.6	11.6	2.1	1.8	0.4	81%	0.9	1.0	17.0	13.5	0.6
2022 NPS+Micros												0.9	1.0	25.6	20.5	1.0
Piquillín																
2008	3.5	34.9	6.5		3.0				2.3							
2013 Testigo	3.5	21.8	7.1		2.5	17.5	13.1	1.9	1.8	0.1	97%					
2013 NPS	3.5	45.0	7.9		2.6	18.1	14.3	2.0	1.8	0.1	100%					
2022 Testigo	3.1	36.5	6.8		27.9	21.8	13.1	2.5	2.1	0.3	83%	0.7	0.6	12.0	20.2	0.4
2022 PS	2.7															
2022 NS		40.5														
2022 NPS					31.0											
2022 NPS	3.6	86.5	6.5		22.2	21.6	13.9	2.4	2.1	0.3	86%	0.6	0.6	19.4	20.9	0.4
2022 NPS+Micros												0.7				0.7
Totoral																
2008	2.4	47.2	6.7		1.7				1.2							
2013 Testigo	2.4	15.7	7.3		2.1	11.7	9.1	1.4	0.9	0.1	98%					
2013 NPS	2.4	48.8	8.1		1.9	12.9	10.5	1.4	0.9	0.2	100%					
2022 Testigo	2.7	50	6.8		8.0	15.6	11.6	2.1	1.7	0.2	100%	0.6	0.9	22.5	17.6	0.6
2022 PS	2.3															
2022 NS		67.5														
2022 NPS					10.9											
2022 NPS	2.7	97	6.5		12.3	15.3	11.1	1.9	1.7	0.5	99%	0.6	0.9	30.5	18.0	0.6
2022 NPS+Micros												1.4				1.0

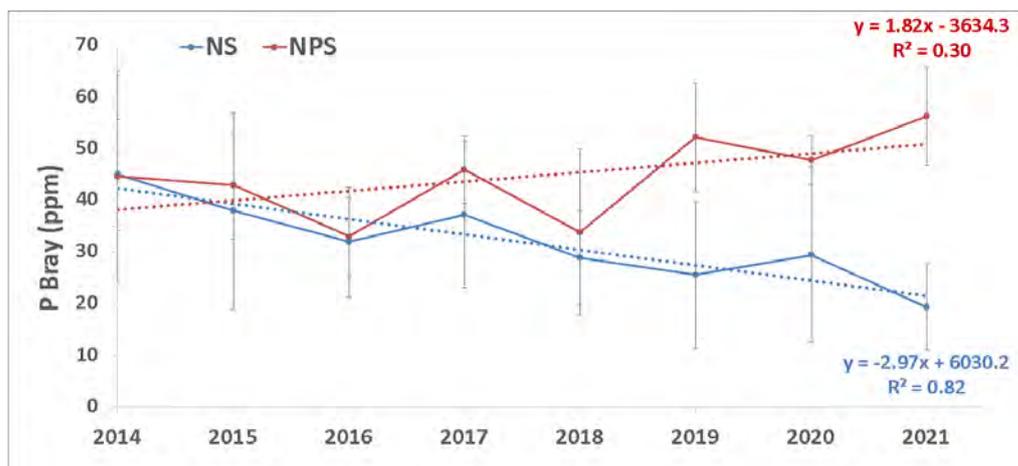


Figura 10. Evolución de los niveles de P Bray a través de los siete años de evaluación para los tratamientos NS y NPS. Promedios de los tres sitios experimentales de C. Almada, Piquillín y Totoral, 2014/15 a 2021/22 inclusive.

Los balances de N fueron negativos para todos los tratamientos ya que las dosis aplicadas buscaban optimizar rendimientos sin reponer el N removido en granos y el aporte de la fijación biológica de N en soja se consideró del 60% del N

absorbido por el cultivo (**Figura 11**). En el caso de S, las dosis aplicadas, en los tratamientos correspondientes, permitieron mantener balances levemente positivos.

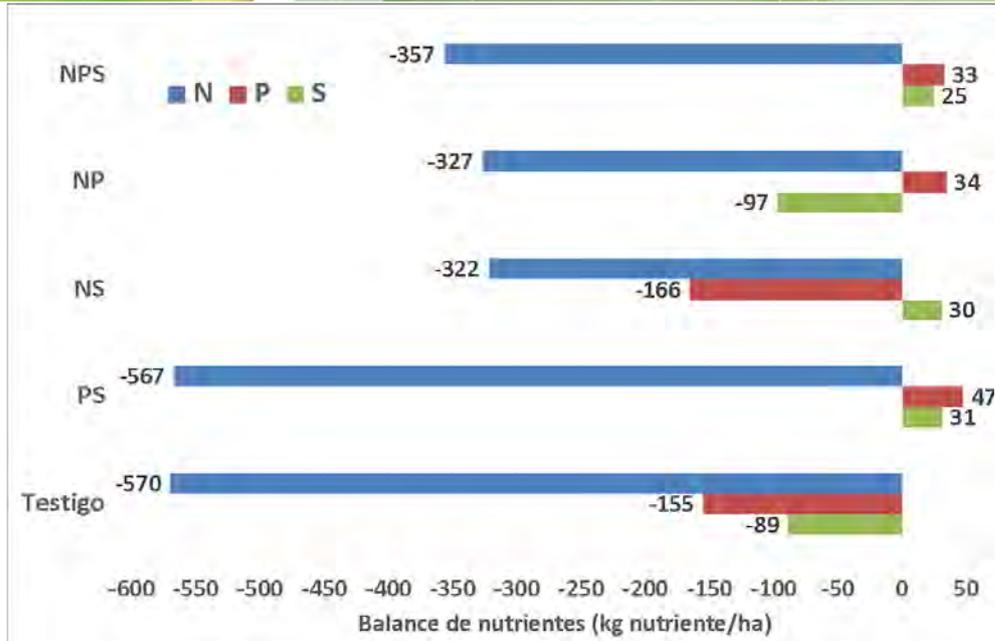


Figura 11. Balance de nutrientes N, P y S, promedios de C. Almada, Piquillín y Totoral, para los seis tratamientos de fertilización. Periodo 2014/15 a 2021/22 inclusive.

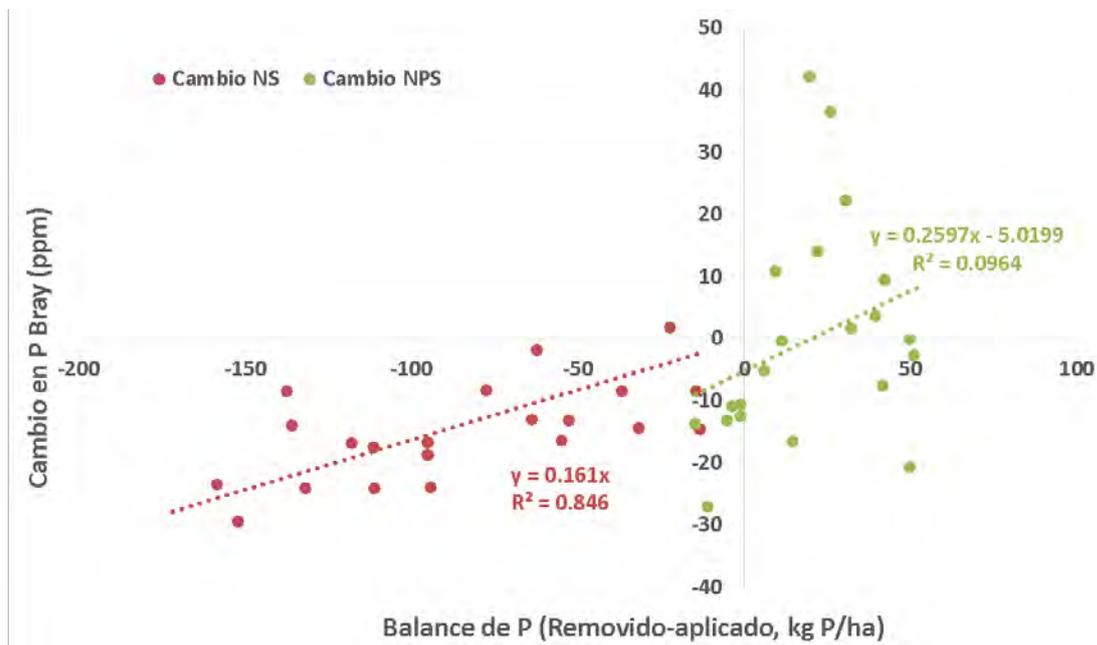


Figura 12. Cambios de P Bray según balances de P. Datos de 2014/15 a 2021/22 para los sitios C. Almada, Piquillín y Totoral.

Conclusiones

- ✓ El análisis de ocho años (2014/15 a 2021/22) muestra respuestas generalizadas a N en maíz, con interacciones con P y S según el

sitio, pero bajas respuestas en soja. En maíz, para rendimientos menores de 8000 kg/ha, la respuesta más destacada es a N, mientras que para rendimientos superiores a 8000 kg/ha, las respuestas son generales a todos

los tratamientos de fertilización. En el caso de soja, las diferencias entre tratamientos son muy bajas y solo se observan diferencias de aproximadamente 200 kg/ha en niveles de rendimiento superiores a 4000 kg/ha.

- ✓ Las respuestas a N en maíz se relacionaron con los análisis de N-nitrato a la siembra + fertilizante o Ns+f (N suelo 0-60 cm + N aplicado como fertilizante), pero esta relación presenta una correlación baja. Varios casos de esta red muestran niveles mayores de rendimiento a los esperados según el nivel de Ns+f. Esta situación estaría indicando un mayor aporte de N por mineralización durante el ciclo del cultivo.
- ✓ La mineralización de N promedio estimada a partir del rendimiento de los tratamientos PS es de 153 kg N/ha (DS 69 kg N/ha). Sumando el promedio de 105 kg Ns a la siembra, la oferta del sistema de 258 kg N/ha podría cubrir los requerimientos de N para 8500-9000 kg/ha de maíz. Debe considerarse que estos valores son promedios y que se observó una gran variabilidad entre sitios y campañas.
- ✓ Las calibraciones existentes de análisis de suelos de P Bray en maíz y soja funcionaron adecuadamente para los sitios evaluados en la región CREA Córdoba Norte. Las respuestas a P o interacciones de P con N o S se registraron mayormente en los sitios con menor nivel de P Bray de la red, o que cayeron a través de los años.
- ✓ En el caso de S, se observa una tendencia de mayor frecuencia de respuesta a S en sitios con rendimientos de maíz superiores a los 8000 kg/ha. La respuesta es moderada, de aproximadamente 250 kg/ha, probablemente a partir del buen aporte por mineralización de S orgánico del suelo y, en general, en interacción con N y/o P.
- ✓ No se observaron respuestas a Zn y B, en la comparación NPSZnB vs. NPS, en ninguno de los ensayos.
- ✓ La fertilización permitió incrementar la eficiencia de uso del agua en maíz, pero no en soja.
- ✓ Las respuestas a NPS no se relacionaron con las precipitaciones totales durante el ciclo de maíz y de soja, y tampoco se observaron diferencias sustanciales en la respuesta a NPS en maíz según sean campañas de años Niña o Niño
- ✓ A través de ocho años de evaluación, los niveles de P Bray fueron disminuyendo en el

tratamiento NS y subiendo moderadamente en el tratamiento NPS. En los tratamientos sin aplicación de P, el P Bray disminuye 0.16 ppm por cada kg de balance negativo de P o, en otras palabras, el P Bray cae 1 ppm cada 6.2 kg de balance negativo de P.

- ✓ Hacia adelante, en cuanto a manejo general de lotes:
 - El N para maíz se podría manejar en función del potencial del ambiente y el análisis de suelo a la siembra. Habría que ir sumando herramientas para predecir mineralización, como el Nan, y fundamentalmente diagnósticos dinámicos comparando el lote con franjas sin restricción de N utilizando imágenes o sensores remotos o locales.
 - Aplicar P en lotes con niveles de P Bray por debajo de los umbrales críticos. En estos casos, se puede plantear reponer P en planteos de rotación privilegiando trigo o coberturas invernales y luego maíz/sorgo. Lotes con niveles de P Bray superiores a los umbrales críticos deben ser monitoreados periódicamente (por ej., cada 2-3 años). Tener muy en cuenta la elevada variabilidad intra-lote de los niveles de P Bray, pensar en muestreos georreferenciados (por ambientes o grillas) y en fertilización fosfatada variable.
 - Seguir chequeando S, la respuesta a N es un buen indicador de posible respuesta a S.
 - Monitorear posibles futuras deficiencias y respuestas de micronutrientes como B y Zn.
- ✓ En cuanto a experimentación complementaria a esta red de ensayos, debería implementarse la evaluación de dosis de N en franjas a escala comercial (nivel de lote/ambiente), en las cuales se incluyan muestreos de suelo para N-nitrato y Nan, de manera de sumar información a la ya generada por esta red.

Agradecimientos

- A todos los productores, asesores y personal de los establecimientos que implantaron los ensayos y participan en este proyecto.
- A *Nutrien Ag Solutions* por su continuo apoyo para la realización de esta Red.

Referencias

Correndo, A., F. Salvagiotti, F. O. García y F. Gutiérrez Boem. 2018. Recalibración de umbrales críticos de P-Bray para maíz y soja en Argentina. CLAP. Santiago, Chile.

Correndo A., F. Gutiérrez Boem, F. O. García, et al. 2021. Attainable yield and soil texture as drivers of maize response to nitrogen:

A synthesis analysis for Argentina. Field Crops Research 273. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108299>

van Ittersum M.K., K.G. Cassman, P. Grassini, J. Wolf, P. Tittonell, y Z. Hochman. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance—A review. Field Crops Research 143: 4–17.

Intensificación sustentable y respuesta a la fertilización nitrogenada en una secuencia vicia-cebada/maíz de segunda*

Crespo, C.^{1,2*}, J. Igarza¹, G. Divito³, P. Barbieri^{2,4}

¹ Facultad de Ciencias Agrarias, UNMDP, Unidad Integrada Balcarce; ² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), ³ Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa (AAPRESID), ⁴ Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Balcarce (INTA)

Contacto: ccrespo@mdp.edu.ar

* Trabajo presentado a XXVIII Congreso Argentina de la Ciencia del Suelo. Buenos Aires, 15-18 noviembre de 2022. AACS-FAUBA-INTA

Resumen

Una alternativa para promover la intensificación sustentable y mejorar la productividad global del sistema, es el uso de dobles cultivos y de cultivos de cobertura (CC). Los CC representan una alternativa económica y ecológicamente viable para incrementar la disponibilidad de nutrientes. La utilización de leguminosas (como la vicia, *Vicia villosa* Roth) puede tener un rol en el mantenimiento de la productividad del suelo a través de la fijación de nitrógeno (N). Por lo tanto, es de gran interés analizar el impacto del cultivo de vicia sobre la disponibilidad de N en los cultivos de cosecha posteriores. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la utilización de vicia como CC sobre la disponibilidad de N en una rotación de vicia-cereal de invierno/maíz de segunda en el Sudeste Bonaerense (SEB).

Se realizó un ensayo experimental en Necochea en la campaña 2020/2021, la secuencia de cultivos fue vicia-cebada/maíz de segunda. El diseño experimental del ensayo fue en parcelas divididas con tres repeticiones. A la parcela principal se le asignó el factor el factor "Antecesor" (Vicia y Testigo (barbecho químico)) y las sub-parcelas el factor "fertilización nitrogenada" (cebada: 0, 140, y 250 kg N ha⁻¹; maíz de segunda: 0, 30 y 60 kg N ha⁻¹). En el suelo se determinó el contenido de N de nitrato (N-NO₃⁻) a la siembra de la cebada y a la siembra del maíz de segunda y el N mineralizado en anaerobiosis (Nan) a la siembra

de la cebada. En la vicia se determinó la acumulación de materia seca (MS) en biomasa aérea y el N en biomasa aérea. En la cebada y en el maíz de segunda se determinó el rendimiento en grano.

El cultivo de vicia acumuló 4 Mg MS ha⁻¹ y 137 kg N ha⁻¹. El N-NO₃⁻ a la siembra de la cebada no varió entre antecesores, pero el Nan fue casi un 50% superior en el tratamiento de vicia (Tabla 1). Se determinaron efectos significativos del antecesor y la fertilización con N sobre el rendimiento de cebada (Tabla 2). Cuando se comparó el rendimiento de los tratamientos sin N, se determinó una diferencia de 2600 kg ha⁻¹ entre antecesores.

El contenido de N-NO₃⁻ a la siembra del maíz de segunda no varió entre antecesores (7.5 y 7.9 kg N ha⁻¹, para el Testigo y la Vicia, respectivamente). El rendimiento del maíz de segunda no varió entre antecesores. Se determinó un efecto de la dosis de N sobre el rendimiento en grano de maíz de segunda (Tabla 3). La respuesta a la fertilización nitrogenada alcanzó los 1948 kg ha⁻¹.

La intensificación de secuencias de cultivos a partir del uso de vicia como CC y de maíz como cultivo doble es factible en el Sudeste Bonaerense. La inclusión de vicia en rotaciones con gramíneas de invierno, como la cebada, resultó de gran utilidad para reducir el uso de fertilizantes nitrogenados, necesarios para cubrir los requerimientos de dicha gramínea. Sin embargo, no se determinaron efectos residuales de la vicia en el segundo cultivo de cosecha.

Tabla 1: Contenido de nitrógeno (N) como nitrato ($N-NO_3^-$) y nivel de N anaeróbico (Nan) en el suelo a la siembra del cultivo de cebada. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre antecesores, según el test de mínima diferencia significativa ($p < 0,05$). Los valores entre paréntesis indican error estándar de la media.

	$N-NO_3^-$		Nan	
	Testigo	Vicia	Testigo	Vicia
	----- $kg\ ha^{-1}$ -----		----- $mg\ kg^{-1}$ -----	
0-20 cm	28,68 (2,01) a	26,15 (4,05) a	43,47 (3,54) B	78,09 (6,55) A
20-40 cm	11,96 (3,24) a	15,43 (3,04) a		
40-60 cm	8,10 (1,96) a	10,99 (2,86) a		

Tabla 2. Rendimiento en grano ($kg\ ha^{-1}$) de cebada para distintas dosis de N y antecesores. Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre dosis de N, y letras mayúsculas diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre antecesores, según el test de mínima diferencia significativa ($p < 0,05$). Los valores entre paréntesis indican error estándar de la media.

Antecesor	Fertilización Nitrogenada	Rendimiento ($kg\ ha^{-1}$)	
Testigo		5425 (456)	B
Vicia		6795 (309)	A
	0 N	5520 (632)	b
	140 N	6783 (448)	a
	250 N	6326 (389)	ab

Tabla 3. Rendimiento en grano ($kg\ ha^{-1}$) de maíz de segunda para distintas dosis de N. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre dosis de N según el test de mínima diferencia significativa ($p < 0,05$). Los valores entre paréntesis indican error estándar de la media.

Fertilización Nitrogenada	Rendimiento ($kg\ ha^{-1}$)	
0 N	5004 (88)	C
30 N	6089 (185)	B
60 N	6952 (144)	A

Análisis del uso de vicia previo a maíz en el sudeste bonaerense

Cafaro La Menza, F. ^{b,*}; Crespo C. ^{a,b}; Domínguez, G. ^a; Rodríguez, P. ^b; Reussi Calvo, N.I. ^{a,b}; Wyngaard, N. ^{a,b}; Sainz Rozas, H.R. ^{a,b,c}; Studdert, G. ^a; Barbieri, P. ^{b,c}; Carciochi, W.D. ^{a,b,*}

^a Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata, Ruta 226 km 73.5, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

^b Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

^c Dep. Agronomía, EEA INTA Balcarce, Ruta 226 km 73.5, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

* francisco.cafa@gmail.com; waltercarciochi@hotmail.com

En las últimas décadas, los sistemas productivos han evolucionado hacia menos variedad de cultivos en las rotaciones y largos periodos de barbecho (Pinto *et al.*, 2017). Esto genera una menor eficiencia en el uso de los recursos, especialmente en el uso de nutrientes. Es por ello que los sistemas productivos se podrían beneficiar al incorporar un cultivo más en la secuencia. Una de las alternativas para lograr intensificar el sistema es la incorporación de cultivos de servicio en el periodo que usualmente se desarrolla el barbecho (Pinto *et al.*, 2017).

La inclusión de cultivos de servicio en las secuencias de cultivos puede mejorar el control de malezas, la estructura del suelo, el contenido de carbono y reducir la erosión, la evaporación desde el suelo y las pérdidas de nutrientes como el nitrógeno (N) (Daryanto *et al.*, 2018). Existen diferentes especies de cultivos de servicio y según la especie serán los beneficios que se obtengan. Entre las especies más utilizadas por los productores del sudeste bonaerense se encuentra la vicia (*Vicia villosa*, Roth.; Vi). Su gran adopción se fundamenta por el control de malezas y el gran aporte de N que hace luego de su supresión, cuando sus residuos se descomponen. Este gran aporte de N proviene en parte de lo absorbido desde el suelo y otra parte de lo obtenido mediante el proceso de fijación biológica del N (Enrrico *et al.*, 2020). El maíz es el cultivo de verano con mayor susceptibilidad a la falta de N y es por ello que normalmente se utiliza a la Vi como cultivo antecesor.

El uso de Vi previo al maíz ha sido evaluado en varios trabajos (e.g. Crespo *et al.*, 2022; Carciochi *et al.*, 2021b; Pott *et al.*, 2021), destacándose una gran variabilidad en la respuesta del rendimiento del maíz al uso de Vi y a la

fertilización con N en maíz cuando se utilizó Vi previo como cultivo de servicio. Esto sugiere que el N aportado por la Vi no siempre sería suficiente para satisfacer la demanda del cultivo de maíz. Además, la Vi brinda otros servicios ecosistémicos no relacionados al aporte de N (efecto no N) que pueden mejorar la productividad del maíz (Ketterings, *et al.*, 2015). Por lo tanto, es esperable que, incluso fertilizando con N, el uso de Vi incremente el rendimiento en grano del maíz. El objetivo de este trabajo es cuantificar en la secuencia Vi/maíz el efecto de la Vi y de la fertilización nitrogenada en el rendimiento en grano de maíz en el sudeste bonaerense.

Para responder a nuestro objetivo se realizaron 25 ensayos en diferentes localidades del sudeste bonaerense (Balcarce, Necochea, Tandil, Lobería, Azul y General Pueyrredón), entre los años 2008 y 2021, donde se evaluaron cuatro estrategias de manejo: barbecho desnudo/maíz sin fertilizar con N ($sVi-M_{-N}$), barbecho desnudo/maíz fertilizado ($sVi-M_{+N}$), Vi/maíz sin fertilizar ($cVi-M_{-N}$) y Vi/maíz fertilizado ($cVi-M_{+N}$). En todos los casos se fertilizó el maíz con una dosis superior a 120 kg N ha⁻¹, asegurando que dicho nutriente no fuera limitante. Al momento de terminación de la Vi se determinó la biomasa aérea acumulada y en madurez fisiológica del cultivo de maíz se realizó la cosecha y se determinó el rendimiento en grano. Para cuantificar el efecto de la Vi y la fertilización con N se realizaron los siguientes cálculos: la respuesta en rendimiento al cultivo de Vi se calculó como la diferencia en rendimiento entre $cVi-M_{-N}$ y $sVi-M_{-N}$. La respuesta a N con Vi se calculó como la diferencia en rendimiento entre $cVi-M_{+N}$ y $cVi-M_{-N}$. La respuesta a N en maíz se calculó como la diferencia en rendimiento entre $sVi-M_{+N}$ y $sVi-$

M_{-N} . Por último, se calculó el efecto “no N” de la Vi como la diferencia en rendimiento entre $cVi-M_{+N}$ y $sVi-M_{+N}$. Para evaluar la significancia estadística de los efectos de la Vi y/o N se realizaron análisis de la varianza para cada ensayo y para todos los ensayos en su conjunto utilizando un nivel de significancia de 0,10. La normalidad de los datos y la homogeneidad de las varianzas se evaluaron mediante las pruebas de Shapiro-Wilks y Levene ($p > 0,05$), respectivamente (R Core Team, 2022).

Para los 25 ensayos, la fecha de siembra de Vi varió desde el 22 de febrero al 19 de mayo y la de terminación desde el 5 septiembre al 14 de noviembre. La duración del ciclo promedio de la Vi fue de 188 días y en promedio su biomasa aérea acumulada al momento de terminación fue de 3084 kg ha^{-1} , con un mínimo de 192 kg ha^{-1} y un máximo de 7036 kg ha^{-1} . La fecha de siembra del cultivo de maíz varió desde mediados de octubre hasta fines de noviembre.

La respuesta a N en maíz fue en promedio de 2781 kg ha^{-1} (Figura 1 a), siendo significativa para 17 de los 25 ensayos (p -valor $< 0,10$). Por otra parte, la respuesta promedio a Vi fue de 1846 kg ha^{-1} (Figura 1 b), donde 13 de los 25 ensayos presentaron respuesta positiva significativa (p -valor $< 0,10$). La respuesta a N con uso de Vi fue en promedio de 1300 kg ha^{-1} (Figura 1 c), con 9 ensayos con respuesta positiva significativa (p -valor $< 0,10$). Por último, la respuesta a Vi en maíz fertilizado con N (efecto no N) promedió los 365 kg ha^{-1} (Figura 1 d), siendo significativa para 7 de los 25 ensayos (p -valor $< 0,10$).

La cantidad de ensayos con respuesta a N (68%) confirman, al igual que en otros trabajos, que la deficiencia de N es una limitante para la producción de maíz en esta zona. Por su parte, la respuesta a Vi encontrada demuestra que existe un efecto positivo del cultivo de servicio sobre el rendimiento del maíz, y que ello podría estar explicado por el aporte de N desde los residuos de Vi hacia el maíz. Al respecto, se observó una gran variabilidad en la producción de biomasa de Vi, generando un aporte diferencial de N entre ensayos, que explica parcialmente la variabilidad en las respuestas en rendimiento del maíz a la Vi.

Nuestra hipótesis de que el N aportado por la Vi no siempre es suficiente para alcanzar el máximo rendimiento fue confirmada. Sin embargo, 64% de los ensayos no mostraron

respuesta a la fertilización con N, es por ello que se debe evaluar cada situación productiva en particular y considerar el aporte de la Vi para calcular la dosis de N a aplicar. Este aporte seguramente se explique en función del N acumulado en la biomasa de Vi y/o por la fecha de terminación que puede afectar la sincronización de N. Por lo tanto, son necesarios estudios posteriores para poder entender y explicar esta variabilidad. Por último, se confirmó otra de nuestras hipótesis, donde en secuencias Vi/maíz existe un efecto de la Vi sobre el rendimiento de maíz que no está relacionado con el aporte de N (efecto no N). Este efecto podría estar relacionado a mejoras en la conservación de la humedad superficial del suelo y mejoras en las propiedades físicas y bioquímicas del suelo. Posiblemente esto pueda ser explicado por las condiciones edáficas y meteorológicas de cada campaña en particular.

En conclusión, para las condiciones ambientales del sudeste bonaerense, la Vi presenta varias ventajas para ser utilizada como cultivo de servicio previo al cultivo de maíz y entre ellas se destaca el aporte de N. En este trabajo se encontró que este aporte no sería siempre suficiente para satisfacer la demanda del maíz, pero permite disminuir las dosis de N a aplicar y por lo tanto se deberá realizar un análisis para cada situación productiva con el fin de ajustar la dosis de fertilizante nitrogenado. A su vez, la variabilidad encontrada en los diferentes tipos de respuesta podría ser explicada por variables de manejo del cultivo de Vi, la acumulación de N en la biomasa de Vi y variables edafoclimáticas. Por último, se visualizó un efecto de la Vi no relacionada al aporte de N, lo cual sugiere que hay que continuar estudiando esta secuencia de cultivos y analizar otras variables que ayuden a explicar la variabilidad.

RESPUESTA EN RENDIMIENTO

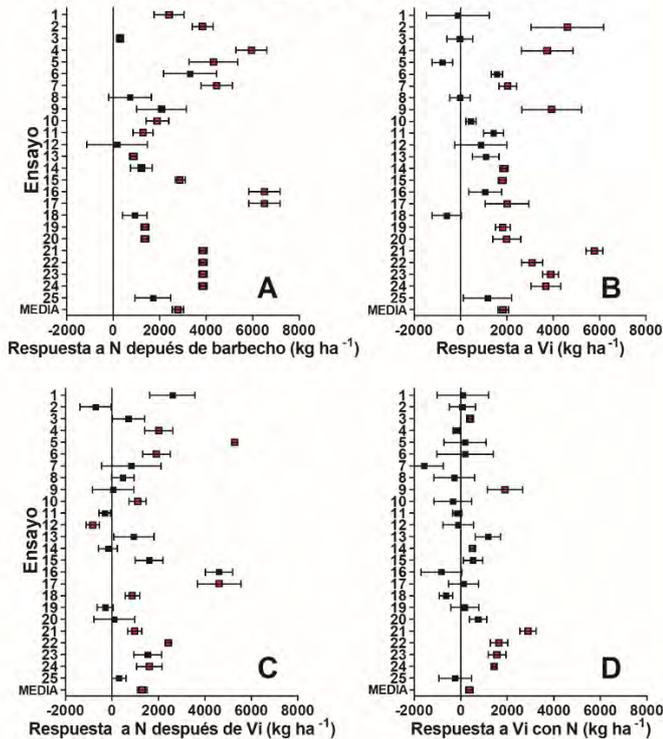


Figura 1: a) respuesta en rendimiento a la fertilización con nitrógeno (N) en maíz proveniente de barbecho desnudo, b) respuesta al uso de vicia (Vi) previo al cultivo de maíz sin fertilización con N, c) respuesta en rendimiento a la fertilización con N en maíz proveniente de Vi y d) respuesta en rendimiento a Vi con fertilización nitrogenada en maíz. Los puntos cuadrados representan el promedio de respuesta para cada ensayo, las barras horizontales representan el error estándar de la media (promedio de tres repeticiones) y los puntos coloreados en rojo son las respuestas que resultaron significativas (p -valor < 0,10).

Bibliografía

Carciochi, W.D., Massigoge, I., Lapaz Oliveira, A., Reussi Calvo, N.I., Cafaro La Menza, F., Sainz Rozas, H.R., Barbieri, P.A., Di Napoli, M., Gonzalez Montaner, J., Ciampitti, I.A., 2021b. Cover crop species can increase or decrease the

fertilizer-nitrogen requirement in maize. *Agron. J.* 113, 5412–5423. <https://doi.org/10.1002/agj2.20791>

Crespo, C., Corral, R.A., Diez, S.N., Delgado, S.G., Domínguez, F., Agostini, M.A., Cendoya, M.G., García, G. V, Studdert, G.A., 2022. Green bridge crops to manage corn nitrogen nutrition in the Southeastern Argentinean Pampas. *Soil Tillage Res.* 218. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105311>

Daryanto, S., Fu, B., Wang, L., Jacinthe, P.A., Zhao, W., 2018. Quantitative synthesis on the ecosystem services of cover crops. *Earth-Science Rev.* 185, 357–373. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.06.013>

Enrico, J.M., Piccinetti, C.F., Barraco, M.R., Agosti, M.B., Ecclesia, R.P., Salvagiotti, F., 2020. Biological nitrogen fixation in field pea and vetch: Response to inoculation and residual effect on maize in the Pampean region. *Eur. J. Agron.* 115. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126016>

Ketterings, Q.M., Swink, S.N., Duiker, S.W., Czymmek, K.J., Beegle, D.B., Cox, W.J., 2015. Integrating cover crops for nitrogen management in corn systems on Northeastern U.S. dairies. *Agron. J.* 107, 1365–1376. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0385>

Pinto, P., Fernández Long, M.E., Piñeiro, G., 2017. Including cover crops during fallow periods for increasing ecosystem services: Is it possible in croplands of Southern South America? *Agric. Ecosyst. Environ.* 248, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.07.028>

Pott, L.P., Amado, T.J.C., Schwalbert, R.A., Gebert, F.H., Reimche, G.B., Pes, L.Z., Ciampitti, I.A., 2021. Effect of hairy vetch cover crop on maize nitrogen supply and productivity at varying yield environments in Southern Brazil. *Sci. Total Environ.* 759, 144313. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144313>

R Core Team, 2022. R: A Language and Environment for Statistical Computing.

Economía del nitrógeno en el maíz luego de diferentes cultivos de servicio

Prieto Angueira, S. ^{1y2*}; M. Lescano ¹; A. Anriquez ²; M.C. Ochoa ²; A. Azar; P. Savino ¹

¹ INTA EEA Santiago del Estero; ² Facultad de Agronomía y Agroindustrias-Universidad Nacional de Santiago del Estero; * Jujuy 850 (4200) Santiago del Estero, Prov. de Santiago del Estero, prieto.salvador@inta.gob.ar

Introducción

Con el objetivo de mejorar los sistemas de producción de la región norte de Argentina, en los últimos años se realizan, previo a maíz, cultivos de servicio (CS) como centeno (C), vicia villosa (Vv) o sus mezclas. Los CS pueden modificar la dinámica y disponibilidad de nitrógeno (N) debido a la inmovilización del nutriente en los tejidos (cualquier CS) y/o a través de la fijación biológica (leguminosas). En general, C disminuye la disponibilidad de N, Vv lo incrementa y las mezclas de ambas especies generan disponibilidades intermedias (Elhakeem et al., 2021). Debido a que en la región el N junto al agua son los principales recursos que limitan la producción, es importante estudiar como los CS afectan la economía del N en el cultivo de maíz y poder así seleccionar las estrategias que permitan maximizar su rendimiento. Asimismo, es conocido que hay diferencias en el comportamiento entre híbridos en la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN, relación entre el rendimiento -Rto- y el N disponible -Ndisp-, Ciampitti y Vyn, 2012), lo que permitiría a partir de una adecuada elección del híbrido incrementar el Rto ante igual Ndisp. Por lo tanto, se iniciaron estudios en el año 2022 con el objetivo de: i) caracterizar como se modifica la economía del N en el cultivo de maíz luego de la realización de CS; y ii) evaluar la eficiencia de uso del nitrógeno y rendimiento en diferentes híbridos sembrados luego de CS como antecesores.

Materiales y métodos

Se realizó un experimento en la campaña 2021/2022 en el establecimiento Santa Inés (27°36'51.85"S;62°43'22.62"O) de la localidad de Isca Yacu, Santiago del Estero. Se evaluó el comportamiento del maíz en respuesta a diferentes antecesores (A): barbecho químico

(B) y los CS C (densidad de siembra, 40 kg. ha⁻¹), Vv (20 kg. ha⁻¹), tres mezclas en mismo surco con Vv y distinta proporción de C, 75 (30 y 20 kg. ha⁻¹ de centeno y vicia, respectivamente), 50 (20 y 20 kg. ha⁻¹ de centeno y vicia, respectivamente) y 25% de C (10 y 20 kg. ha⁻¹ de centeno y vicia, respectivamente) y la mezcla 25%C intercalando un surco de cada especie (25%C Int). Los CS se sembraron el 29/4/2021 y se secaron químicamente el 29/08/2022. Para evaluar los cambios en la respuesta del maíz, se utilizaron dos híbridos (H) NS78178VIP3 y P2089VYHR seleccionados por su comportamiento contrastante en la región. Los híbridos fueron sembrados el 7/01/2022. El diseño utilizado fue completamente aleatorizado en arreglo de parcela dividida con tres repeticiones con los A como parcela principal y los H como subparcela.

En madurez fisiológica (R6, Ritchie y Hanway, 1982), se determinó rendimiento (Rto) y componentes (número de granos por superficie -NGS- y peso medio del grano -PMG-), índice de cosecha (IC) y contenido de N en grano (Ngrano). Para caracterizar economía del N se siguió la metodología propuesta por Maltese et al. (2019). Se determinó el N disponible (Ndisp) como la suma de N-NO₃⁻ en la siembra de maíz (0-100 cm) y mineralización aparente durante el ciclo del maíz (N absorbido en la planta de maíz + N-NO₃⁻ en el suelo en R6 - N-NO₃⁻ en la siembra). En floración (R1, Ritchie y Hanway, 1982) y R6, se determinó el N absorbido (Nabs) en los componentes de la biomasa y total a partir de producto entre la biomasa y la concentración de N. Se calculó el Nabs previo a R1 a partir del valor obtenido en R1 y el Nabs luego de la floración a partir de la diferencia entre el Nabs en R6 y R1 (Nabs Post R1). Se calculó la removilización aparente de tallos y hojas en Post R1 (Rap) a partir de la diferencia del contenido de N total en esa fracción entre R1 y R6. Finalmente se calculó la eficiencia de uso del N (EUN) a partir del cociente

entre el Rto y Ndisp. Debido a que la respuesta al N tiene una fuerte correlación con la disponibilidad del agua se caracterizó también la economía del agua. Para ello se determinó el contenido de agua útil en el suelo en forma gravimétrica hasta 2 metros de profundidad en la siembra (AUi), R1 y R6. Luego se calculó la evapotranspiración real (ETr) pre R1, post R1 y total y la eficiencia de uso del agua para Rto (EUARto). Las variables fueron analizadas mediante ANOVA y las medias fueron comparadas mediante el test de LSD Fischer (Di Rienzo, 2020).

Para responder al primer objetivo se trabajó solamente con el híbrido NS7818VIP3 sobre los A: B, C, Vv y 25%C (se hizo el análisis estadístico bajo un diseño completamente aleatorizado); mientras que para responder el segundo objetivo se trabajó con todos los tratamientos.

Resultados y discusión

Objetivo 1. Caracterización de la economía del N en el cultivo de maíz luego de diferentes CS

Tabla 1. Agua útil inicial (AUi), precipitación total (PP Total) y previo a R1 (Pre R1), evapotranspiración real (Etr) Pre1, Post R1 y total, nitrógeno disponible (Ndisp), nitrógeno absorbido (Nabs), removilización aparente de tallos y hojas en Post R1 (Rap), rendimiento (Rto), índice de cosecha (IC), contenido de N en grano (Ngrano) y eficiencia de uso del agua en la producción de grano (EUAgrano) en el cultivo de maíz luego de los antecesores barbecho químico (B), centeno (C), vicia villosa (V) y mezcla de ambos con 25% de C (25%C).

		B	C	25%C	Vv	P-valor ¹
AUi (mm)		171 A	143 B	100 C	106 C	**
PP Total (Pre R1)		364 (198)				
Etr	Pre R1	196	188	160	172	ns
	Post R1	199	173	206	195	ns
	Total	395	362	366	367	ns
Ndisp (kg.ha ⁻¹)		114 B	105 B	146 A	164 A	***
Nabs (kg.ha ⁻¹)	Pre R1	97	93	104	114	ns
	Post R1	1 C	-5 C	25 B	34 A	***
	Total	98 C	88 C	129 B	148 A	***
Rap (kg.ha ⁻¹)		62 (6)	61	61	68	ns
Rto (kg.ha ⁻¹)		8385 B	6798 C	8793 AB	9268 A	***
IC		0.49 B	0.46 C	0.52 A	0.52 A	***
Ngrano (%)		0.94 C	0.90 C	1.07 B	1.20 A	***
EUAgrano (kg.ha ⁻¹ .mm ⁻¹)		21.2 B	18.8 B	24.1 A	25.3 A	**

¹, ns = p>0,05; * = p<0,05; ** = p<0,01; *** = p<0,001. Letras distintas indican diferencias significativas (p<0,05).

Objetivo 2. Eficiencia de uso del nitrógeno en diferentes híbridos luego de CS

Los A generaron diferente Ndisp (Figura 1) y consecuentemente se encontraron diferencias (p<0.0001) en el Rto, siendo superior en los CS de Vv puro o sus mezclas (mayor NGS y PMG, Tabla

1). Sin embargo, no se obtuvieron diferencias en la EUN (Tabla 2).

En cuanto al comportamiento de los H, P2089VYHR tuvo una significativa ($p < 0.001$) mayor EUN y por lo tanto un rendimiento superior independientemente del A (interacción A*H no significativa, Tabla 2). El Rto se relacionó positiva y significativamente con el Ndisp en ambos H (Figura 1), siendo la pendiente superior ($p < 0.10$) en P2089VYHR. Por lo tanto, la correcta selección del H permitiría en condiciones de mayor Ndisp como con CS con Vv, incrementos superiores en el Rto en H con mayor EUN.

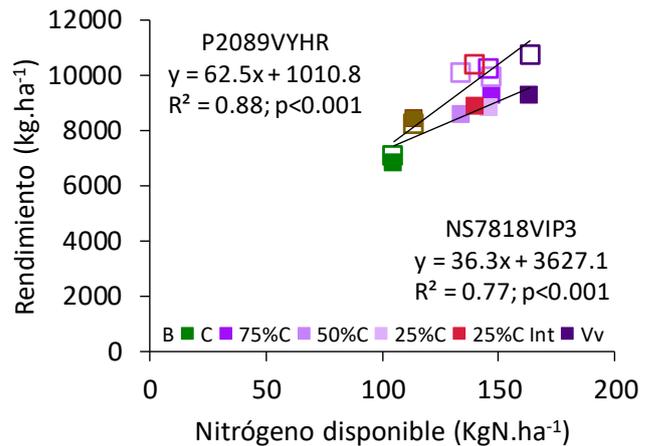


Figura 1. Relación entre el rendimiento y nitrógeno disponible en los híbridos NS7818VIP3 (símbolos llenos) y P2089VYHR (símbolos vacíos) a través de los antecesores barbecho químico (B), centeno (C), mezclas 75% C, 50% C, 25% C y 25% C Int y vicia villosa (V).

La mejora del Rto en los H modernos con mayor EUN, está asociada a caídas en la concentración de N en el grano (Ciampitti y Vyn, 2012). Esto deberá ser tenido en cuenta en futuros estudios.

Tabla 2. Rendimiento (Rto), número de granos por superficie (NGS), peso medio del grano (PMG) y eficiencia de uso del nitrógeno (EUN) en los híbridos NS7818VIP3 y P2089VYHR sobre los antecesores barbecho (B), centeno (C), mezclas 75% C, 50% C, 25% C y 25% C Int y vicia villosa (V). Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

	Rto (kg. ha ⁻¹)	NGS (#.m ⁻²)	PMG (mg)	EUN (kg grano. kgN disponible ⁻¹)
Antecesor				
B	8294 (155) B	3418 (33) A	243 (6) B	72.8 (2.2)
C	6922 (278) C	3075 (86) B	225 (7) C	66.3 (3.5)
75%C	9585 (309) A	3534 (83) A	271 (5) A	65.4 (3.3)
50%C	9307 (431) A	3454 (159) A	270 (6) A	69.9 (4.6)
25%C	9495 (376) A	3468 (141) A	274 (3) A	65.4 (3.1)
25%C Int	9609 (362) A	3430 (113) A	281 (7) A	68.9 (3.9)
Vv	10009 (467) A	3540 (95) A	282 (6) A	61.2 (3.2)
Híbrido				
NS7818VIP3	8557 (184) b	3253 (49) b	263 (4)	63.8 (1.5) b
P2089VYHR	9506 (323) a	3581 (54) a	264 (6)	70.5 (2) a
A ¹	***	**	***	ns
H	***	***	ns	**
A*H	ns	ns	ns	ns

¹, ns = $p > 0,05$; * = $p < 0,05$; ** = $p < 0,01$; *** = $p < 0,001$. Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre A y minúsculas entre H.

Conclusiones

La realización de CS modificó la oferta de N para el maíz. La realización de Vv permitió al maíz una mayor absorción de N Post R1 y Total lo

que generó un mayor IC, Rto y Ngrano. Si bien los CS no modificaron la ETr, los cambios en la economía de N, posibilitaron una mayor EUAgrano en el maíz con antecesor Vv.

La selección de híbridos de mayor EUN permite ante situaciones de mayor nitrógeno disponible generados por cultivos de servicio con vicia villosa, incrementos en el rendimiento.

Agradecimientos

Los autores agradecen a J.C. Rodríguez, M. Umbidez, R. Rodríguez y A. Rodríguez por la asistencia técnica en el experimento de campo. Agradecen al Sr. Marcos Bunge del establecimiento Santa Inés por permitir la realización de este trabajo y a INTA (PEI013, PEI042 y PAL399), CREA Región NOA y CORTEVA por la financiación.

Bibliografía

Ciampitti, I.A., Vyn, T.J., 2012. Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: A review. *Field Crops Res.* 133, 48-67.

Elhakeem, A., Bastiaans, L., Houben, S., Couwenberg, T., Makowski, D., van der Werf, W., 2021. Do cover crop mixtures give higher and more stable yields than pure stands? *Field Crops Res.* 270, 108217.

Di Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & CW Robledo. InfoStat versión 2016. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

Gallais, A., Coque, M., 2005. Genetic variation and selection for nitrogen use efficiency in maize: A synthesis. *Maydica* 50, 531-547.

Maltese, N.E., Melchiori, R.J.M., Maddonni, G.A., Ferreyra, J.M., Caviglia, O.P., 2019. Nitrogen economy of early and late-sown maize crops. *Field Crops Res.* 231, 40-50.

Prieto Angueira, S.; Berton, M.C.; Ventura, J. 2020. Ecología y cultivos en los sistemas de producción CREA. Región Chaco Santiaguense. En: *Sistemas productivos sostenibles: bases y experiencias para repensar el modelo de producción agrícola y su relación con la ganadería* (Ed. Satorre, E.H). Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola – AACREA-. Libro digital. ISBN 978-987-1513-31-4.

Ritchie, S.W., Hanway, J.J. 1982. How a corn plant develops? *Coop. Extension S. Iowa State Univ. Of Science and Technology*, Ames, Iowa.

¿Puede la vicia como cultivo de cobertura previo a soja contrarrestar la limitación de N en soja de alto rendimiento?

Salvagiotti F.¹, Damianidis D.¹, Bacigaluppo S.¹, Pozzi R.², Pérez D.², Ermacora M.³, Monzon J.P.⁴, Enrico, J.M.¹

¹EEA INTA Oliveros; ²Región CREA Sur de Santa Fe; ³Región CREA N de Buenos Aires, ⁴INTA Balcarce
salvagiotti.fernando@inta.gob.ar

Introducción

El rendimiento y el contenido de proteína en grano de soja dependen de la nutrición nitrogenada. Alrededor del 60% del N de la semilla proviene de la removilización (Ortez et al, 2019), y la absorción de N durante el llenado de granos (suelo o fijación biológica de N, FBN) es especialmente crítica para la soja de alto rendimiento (Salvagiotti et al, 2008). En Argentina el aporte de N por la fijación biológica es en promedio del 60% del N requerido por el cultivo (Collino et al, 2015). Existen evidencias que sugieren la existencia de una limitación en la expresión del rendimiento por déficit de N en ambientes de alta producción (mayor a 5000 kg ha⁻¹), lo que implicaría la existencia de una brecha de N (diferencia entre el N requerido por el cultivo y aquel proveniente de la fijación biológica de N) (Ciampitti y Salvagiotti, 2018; Cafaro La Menza et al, 2017). Dado que la fertilización con N no ha tenido éxito en aumentar el rendimiento de la semilla debido a la relación negativa entre el N del suelo y la BNF (Salvagiotti et al, 2009), planteamos la hipótesis de que los residuos de un cultivo de cobertura de leguminosas sembrado previo a soja liberarán el N más lentamente y aumentará el aporte de N para una soja de alto rendimiento. El objetivo de este trabajo fue evaluar los efectos de incluir vicia como cultivo de cobertura para contrarrestar una posible limitación de N en soja de alto rendimiento.

Materiales y métodos

Durante las campañas 2019-20 y 2020-21 en 13 lotes de producción ubicados en la región pampeana de Argentina que tenían un historial

de alto rendimiento en soja se evaluaron dos tratamientos: vicia/soja y barbecho/soja, dispuestos en bloques al azar con dos o tres repeticiones. Se determinó la biomasa producida por el cultivo de vicia al momento del secado (aproximadamente un mes antes de la siembra de la soja). La siembra del cultivo de soja se realizó en fecha óptima (fines de octubre – principios de noviembre) con el objetivo de maximizar el rendimiento. En el cultivo de soja se determinaron la biomasa alcanzada en los estadios fenológicos de R5 y R7 y el rendimiento en grano. La información fue analizada a través de un ANOVA para detectar diferencias entre tratamientos.

Resultados

La biomasa aérea total de vicia osciló entre 1748 y 4937 kg ha⁻¹. En R5 de la soja, la biomasa aérea promedió 9486 kg ha⁻¹ cuando vicia fue el cultivo anterior, observándose un aumento del 12% en comparación a cuando el cultivo fue sembrado posterior al barbecho. El rendimiento en grano de la soja osciló entre 4132 y 7034 kg ha⁻¹ después del barbecho (5234 kg ha⁻¹ en promedio) y entre 4191 y 6630 kg ha⁻¹ después del cultivo de cobertura vicia (5198 kg ha⁻¹). En cuatro de los trece lotes, la secuencia vicia/soja superó al barbecho/soja entre un 5 y 7%, mientras que en otros cuatro lotes la secuencia barbecho/soja aumentó entre 5 y 11% respecto a vicia/soja (P<0,05) (Figura 1).

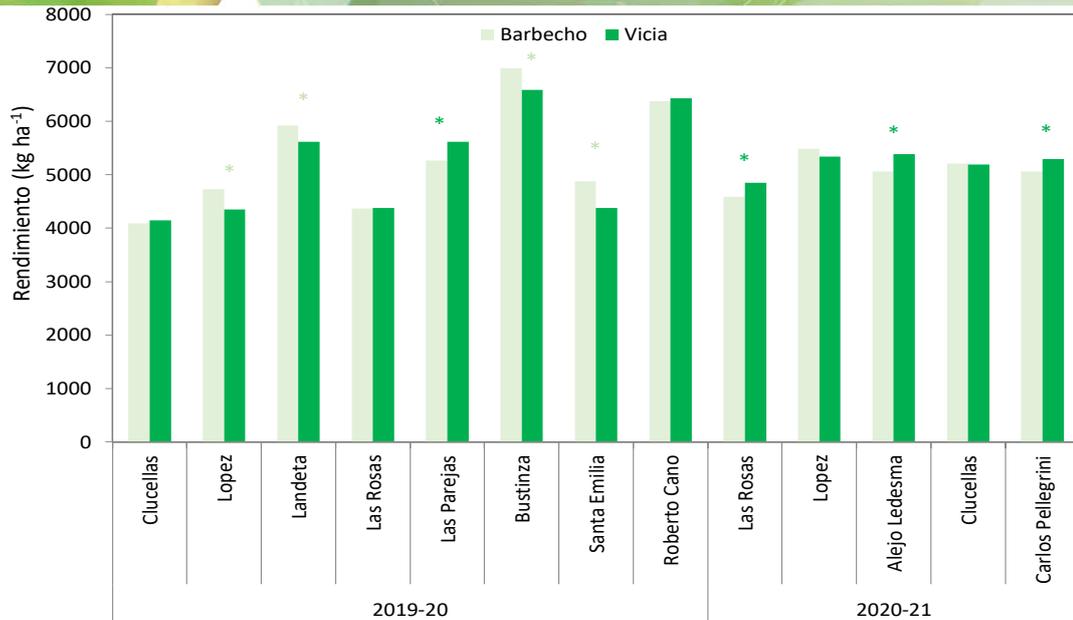


Figura 1. Rendimiento del cultivo de soja en función del antecesor en dos campañas

La inclusión de vicia como cultivo de cobertura previo a una soja de alto rendimiento mostró diferentes impactos dependiendo del sitio. En los lugares donde el barbecho superó a la vicia, el N puede no haber sido el principal factor limitante. Esto sugiere que la disponibilidad de agua o las condiciones particulares de aporte de N a través de la mineralización de la materia orgánica del suelo en cada lote pudo haber afectado la dinámica del nitrógeno en el sistema suelo- cultivo de manera diferente, y que debe ser tenido en cuenta simultáneamente para brindar el N adicional en planteos de soja de alta producción.

Bibliografía

Cafaro La Menza, N., J.P. Monzon, J.E. Specht, and P. Grassini. 2017. Is soybean yield limited by nitrogen supply? *Field Crops Res.* 213:204– 212. doi:10.1016/j.fcr.2017.08.009

Collino D J, Salvagiotti F, Peticari A, Piccinetti C, Ovando G, Urquiaga S and Racca RW. 2015.

Biological nitrogen fixation in soybean in Argentina: relationships with crop, soil, and meteorological factors. *Plant Soil* 1-14

Ortez, O.A., Salvagiotti, F., Enrico, J.M., Vara Prasad, P.V., Armstrong, P., Ciampitti, I.A. 2018. Exploring nitrogen limitation for historical and modern soybean genotypes. *Agronomy Journal*. DOI: 10.2134/agronj2018.04.0271

Ciampitti, I.A., Salvagiotti, F. 2018. New insights into soybean biological nitrogen fixation. *Agronomy Journal*. 110[4], 1-12. DOI: 10.2134/agronj2017.06.0348

Salvagiotti F, Specht JE, Cassman KG, Walters DT, Weiss A and Dobermann A. 2009. Growth and Nitrogen Fixation in High-Yielding Soybean - Impact of N Fertilization. *Agronomy Journal*, 101:958-970

Salvagiotti F, Cassman KG, Specht JE, Walters DT, Weiss A and Dobermann A. 2008. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Research*, 108:1-13.

El rendimiento potencial de la soja en Argentina depende de la nutrición biológica de nitrógeno

Dr. (Ing. Agr.) Carlos Fabián Piccinetti¹ e Ing. Agr. Alejandro Perticari²

¹ Laboratorio BPCV-IMYZA-INTA Castelar: ² AER Concarán INTA San Luis

El potencial productivo de la soja si no hay otras limitantes está correlacionado a la cantidad de nitrógeno (N) acumulado en sus estructuras, por lo tanto, si el cultivo tiene la capacidad de acumular altos contenidos de N es probable que se consigan altos rendimientos. En Argentina, la fertilización con N es poco frecuente debido a que con la simbiosis soja-*Bradyrhizobium* le permite acumular altas tasas de N y lograr elevados rendimientos de grano. Esta simbiosis está ampliamente distribuida en la mayoría de los lotes sojeros porque los rizobios específicos fueron incorporados con la inoculación de las semillas en cultivos previos y generan nodulación espontánea. Sin embargo, la inoculación como práctica habitual de este cultivo con inoculantes de calidad y con cepas eficientes para fijar N son capaces de generar aportes a la producción del cultivo.

El objetivo del trabajo fue determinar si con el empleo de inoculantes se observan efectos positivos en la nutrición biológica nitrogenada de soja y en el rendimiento de granos en diferentes sitios productivos de Argentina. Los ensayos de campo se realizaron en diferentes localidades del país en lotes con historia de soja previa (Figura 1). El diseño experimental fue de bloques completos al azar con 3 y/o 5 repeticiones.

Los tratamientos evaluados fueron: 1. Control sin inocular y 2. Inoculado. Las variables evaluadas fueron el N absorbido (Nabs) por el cultivo, el aporte de N desde la fijación biológica de N (NFBN) y el rendimiento de granos (RG).

El tratamiento inoculado aportó un 11,3% más de N desde la FBN, además este tratamiento

contenía un 9,2% más de N absorbido en la biomasa total aérea. Por otra parte, promovió un 4,1% de incremento en el rendimiento de granos (Figuras 1B, 1C y 1D). Se pudo observar además que tanto el Nabs como NFBN tienen relación directa con el potencial de RG, mientras que el N aportado por el suelo (Ns) no sigue la misma dinámica (Figuras 2B, 1C y 1D).

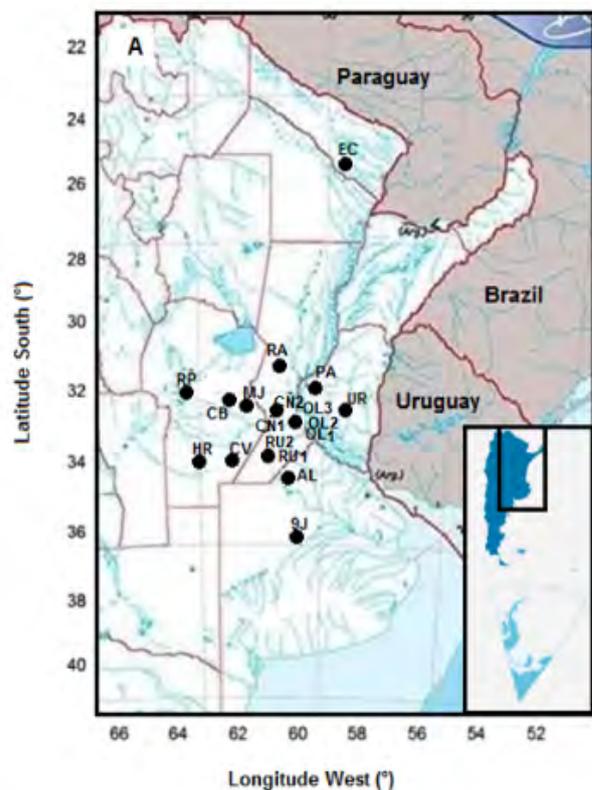


Figura 1: Localidades dónde se realizaron los ensayos de soja

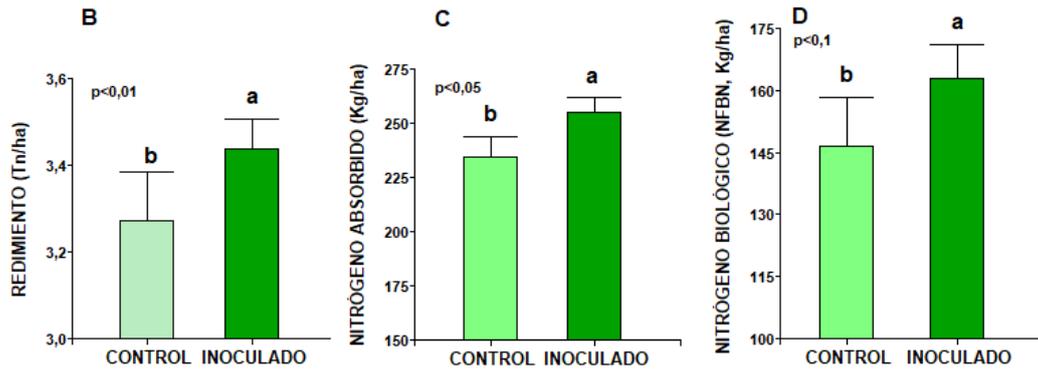


Figura 1: B) Rendimiento de granos; C) Nitrógeno absorbido por la biomasa aérea total en R6 y D) aporte de Nitrógeno desde la simbiosis del tratamiento inoculado respecto del control sin inocular.

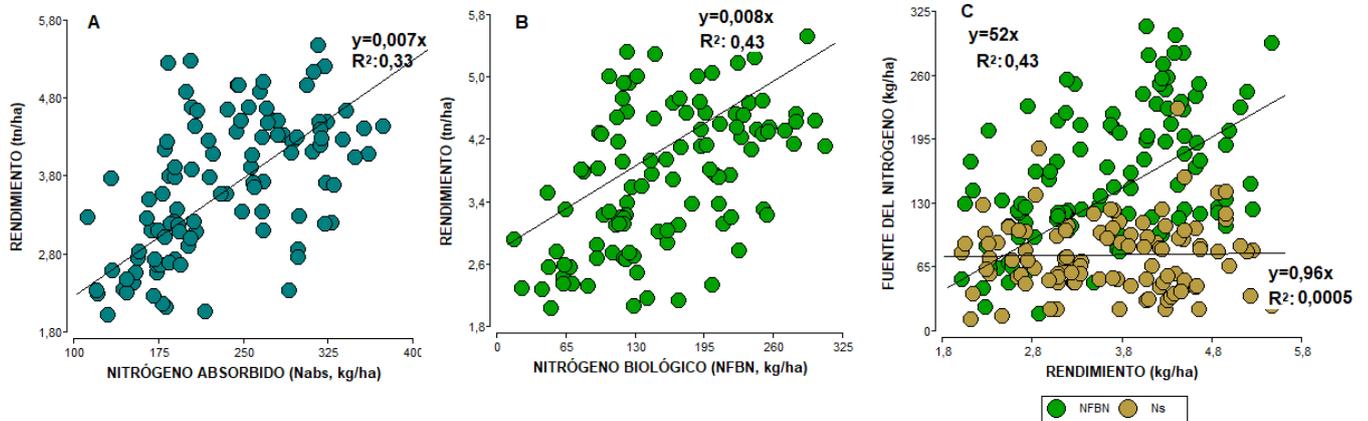


Figura 2: A) Relación entre el nitrógeno absorbido y el rendimiento de granos; B) relación entre el nitrógeno aportado desde la simbiosis y el rendimiento de granos y C) relación entre el nitrógeno aportado por la simbiosis y el N aportado desde el suelo y el rendimiento de granos.

En este estudio la inoculación de soja generó efectos positivos sobre la nutrición nitrogenada e incrementó el RG.

Los cambios estuvieron asociados a mayores aportes desde la simbiosis (NFBN) colaborando con la nutrición nitrogenada y potencial productivo de la soja.

Efecto de la inoculación con *Azospirillum spp* en *Triticum aestivum*

L. Marchese S. I., Canchero J. R., García Guzmán E., Dunogent A. R., Puig Stivanello N. H., Filosofía J., Míguez A. E. J., Sarti G. C., Miralles D. J., Curá J. A.

Ante el incremento de la demanda de alimentos en las últimas décadas, la superficie sembrada de cultivos extensivos fue en aumento. Esto llevó a que se deteriore el suelo por la extrema remoción de nutrientes sin reposición, y se contaminen cuerpos de agua por la inadecuada aplicación de fertilizantes.

Para sostener la productividad y reducir nuestro impacto en el ambiente, debemos buscar alternativas de manejo sustentable. Se sabe que existen microorganismos benéficos en el suelo capaces de solventar los requerimientos nutricionales de la planta a la vez que le proveen mecanismos de defensa frente a patógenos. Estos microorganismos son conocidos como rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR, por sus siglas en inglés) y podrían ser una estrategia para maximizar los rendimientos.

En el presente trabajo se evaluó el efecto de la inoculación de semillas de trigo, variedad

Baguette 620, con una cepa del género *Azospirillum spp*. El ensayo se realizó en tres localidades: Emilio Ayarza y Trenque Lauquen (PBA), y el tercero en C.A.B.A. Se midió la biomasa en distintos estadios fenológicos y el contenido de nitrógeno en tejidos; el rendimiento y sus componentes, número y peso de granos por metro²; y el contenido de proteína en grano. Los resultados se analizaron estadísticamente mediante el Análisis de Varianza y las diferencias entre medias se analizaron utilizando el test de Tukey con un valor de significancia del 0,05.

Se observaron diferencias significativas entre tratamientos en el rendimiento, biomasa y contenido de nitrógeno en tejidos, siendo mayor en todos los casos en el tratamiento inoculado. En algunas localidades, la diferencia en el rendimiento alcanzó los 300 kg.ha⁻¹ que se explicó por un mayor número de granos.

Reducción de la fertilización química en trigo por medio de la inoculación con *Azospirillum argentinense*

Daniela Vallejo¹; Julia García¹; Pablo Senés²; Adolfo Bercheñi² y Mariana Puente¹

¹Instituto de Microbiología y Zoología Agrícola, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina.

²PROVIV, BIO-QUIMICA SRL. Parque Industrial Formosa. Formosa, Argentina

Introducción

El trigo, junto al maíz y el arroz, es uno de los principales cultivos a nivel mundial y en Argentina, ya que conforman la base de la alimentación. En busca de obtener mayores rendimientos, como consecuencia del crecimiento de la población global, se tienen en cuenta diversas estrategias, entre ellas, selección adecuada de las variedades a implantar, manejo de rotaciones, uso adecuado de fungicidas, insecticidas y herbicidas, aumento de los niveles de fertilización con productos de síntesis química, entre otras. Entre los fertilizantes mayormente utilizados se pueden destacar la urea y el fosfato diamónico como fuentes nitrogenadas y fosforadas, respectivamente en este cultivo. Sin embargo, se debe tener en cuenta que, un uso excesivo de fertilizantes químicos podría presentar desventajas como la contaminación ambiental, donde los excesos de nutrientes se acumulan en las aguas superficiales y subterráneas favoreciendo los procesos de eutrofización, acidificación y toxicidad. A su vez, se produce un aumento en los costos de producción como consecuencia de las mayores dosis de fertilizantes y de la suba de precios disparada por el conflicto bélico entre Rusia y Ucrania. En este sentido, surgen alternativas tecnológicas que permiten sostener los altos rendimientos y a su vez, ser amigables con el medioambiente. Entre ellas, cabe destacar el uso de biofertilizantes que contienen bacterias promotoras del crecimiento vegetal las cuales influyen de manera positiva en las plantas a través de diferentes mecanismos de acción como la fijación biológica del nitrógeno, la solubilización de diversas fuentes de nutrientes insolubles, la producción de fitohormonas como ácido indolacético, giberelinas, citoquininas, la producción de sideróforos, la mineralización, la producción de diversas enzimas y a su vez, pueden mejorar la eficiencia de uso de los nutrientes. El presente

trabajo tuvo como objetivo evaluar la posibilidad de disminuir las dosis de la fertilización química en el cultivo de trigo a través de la inoculación con “RIZOVIV” (Bio-Química S.R.L.) cuyo principio activo es *Azospirillum argentinense* Az39.

Materiales y métodos

El ensayo se llevó a cabo en cámara de cultivo con temperatura y luz controladas en función a los requerimientos del cultivo en estudio. Se utilizaron semillas de trigo var. Ñandubay que se sembraron en macetas de 5 litros. Como sustrato se utilizó una mezcla estéril compuesta por tierra, vermiculita, arena y perlita en proporción 3:3:3:1. Se evaluaron 4 dosis de fertilización con NPK (15-15-15) aplicando 0, 1.5, 2.2 y 3 g del fertilizante por maceta al momento de la siembra. Las dosis se corresponden al 0, 50, 75 y 100% del requerimiento óptimo para el cultivo de trigo. Estos tratamientos se combinaron con la inoculación en semilla (10 ml·kg⁻¹). El inoculante utilizado fue “RIZOVIV” (Bio-Química S.R.L.) cuyo principio activo es *Azospirillum argentinense* Az39. Previo a la inoculación se llevó a cabo el correspondiente control de calidad del inoculante. Para el recuento de células viables se empleó la técnica de la microgota en medio RC (Di Salvo, García, Puente *et al.*, 2022). Se determinó el pH, la presencia de microorganismos contaminantes mediante siembra en placa con medio TSA y Agar Sabouraud y se realizó tinción de Gram siguiendo el protocolo del “Manual de procedimientos microbiológicos para la evaluación de inoculantes” de la Red de Calidad de Inoculantes (Cassán *et al.*, 2015).

El ensayo fue conducido hasta el estadio fenológico de fin de macollaje donde se midieron los siguientes parámetros: largo de parte aérea (LPA), biomasa fresca (PFPA) y seca de parte aérea (PSPA), biomasa seca radicular (PSR), largo radicular (LR) y cantidad de macollos (N° macollos). El ensayo presentó un diseño al azar

(n=24) y las medias se compararon con la prueba t.

Resultados

Del control de calidad del inoculante se pudo evidenciar que el producto presentaba características óptimas para su uso (Tabla 1).

Tabla 1. Información obtenida a partir del control de calidad realizado al inoculante “RIZOVIV”.

Recuento de células viables	2·10 ⁹ ufc·ml ⁻¹ *
Observación <i>in vivo</i>	Se observaron bastones típicos de <i>Azospirillum</i> con movimiento característico del género
Microorganismos contaminantes	No se observaron contaminantes en los medios evaluados
Tinción de Gram	Bastones pequeños de coloración rosada típica de bacterias Gram negativas. Sin presencia de contaminantes
pH	7,07 *

* valor promedio de tres repeticiones

Luego de 42 días de sembrado el ensayo, se cosechó y se procedió a evaluar los parámetros LPA, LR, N° macollos, PFPA, PSPA y PSR. Con el objetivo de comparar la respuesta obtenida entre los tratamientos y poder visualizar el potencial que tiene la práctica de inoculación microbiana para disminuir la fertilización química, se realizó un análisis comparando el tratamiento sin inocular y fertilizado con NPK al 100% y al 75% (dosis óptima y subóptima para el cultivo) frente a los tratamientos inoculados con RIZOVIV y adicionados con NPK en las dosis baja, media y óptima (50, 75 y 100%).

En la Tabla 2, se presenta la comparación del tratamiento con fertilización del 100% y sin inocular frente a los tratamientos inoculados en semilla con RIZOVIV y con dosis variables de fertilización (50%, 75% y 100%). Los tratamientos inoculados y fertilizados con dosis del 50 y 75% de NPK presentaron incrementos significativos en el parámetro largo radicular (LR) del 21.2% y 24%, respecto al tratamiento sin inocular y fertilizado con 100% NPK. El largo de parte aérea (LPA) también presentó un incremento (no significativo) de un 3.4% (50% NPK) y 6.4% (75% NPK), respecto al tratamiento

con fertilización óptima y sin inocular, mientras que el peso fresco de parte aérea (PFPA) sólo se vio influenciado de manera positiva con el tratamiento de inoculación y dosis media de fertilización, mostrando un incremento del 6.9% respecto al tratamiento sin inocular y fertilizado al 100%. El tratamiento inoculado y fertilizado al 100% no presentó mejoras en ninguno de los parámetros medidos.

Tabla 2. Comparación de la respuesta obtenida entre el tratamiento con la máxima fertilización y sin inocular vs. los tratamientos inoculados y fertilizados en los distintos parámetros medidos.

Tratamientos	S/I + 100 %F	I + 50 %F	I + 75 %F	I + 100 %F
LPA (cm)	33,61	34,75	35,77	28,48
LR (cm)	20,17	24,44*	25,02*	15,47
N° macollos	7,88	7,17	7,58	6,38
PFPA (g)	10,18	9,18	10,88	7,58
PSPA (g)	2	2	2,21	1,41
PSR (g)	1,16	0,96	0,97	0,86

Tratamientos: S/I: sin inocular, I: inoculado, F: fertilizado
* indica diferencia significativa $p \leq 0,05$ respecto al Tratamiento de semilla sin inocular + 100% NPK (4)

Al evaluar los resultados, pero ahora tomando como parámetro el tratamiento sin inocular y fertilizado al 75% con NPK, se observó que también fue la longitud radicular (LR) el parámetro influenciado de manera positiva y significativa al inocularse las semillas con RIZOVIV y fertilizando con dosis de 50 y 75%, mostrando incrementos del 20,7% y 23,5%, respectivamente. Por otro lado, el peso fresco de la parte aérea (PFPA) también mostró un incremento (no significativo) del 3,5% cuando las semillas fueron inoculadas con RIZOVIV y fertilizadas con 75% de NPK (Tabla 3).

Tabla 3. Comparación de la respuesta obtenida en los distintos parámetros entre el tratamiento con fertilización al 75% y sin inocular vs. los tratamientos inoculados y fertilizados con baja y media fertilización.

Tratamientos	S/I + 75 %F	I + 50 %F	I + 75 %F
LPA (cm)	36,4	34,75	35,77
LR (cm)	20,25	24,44*	25,02*
N° macollos	7,57	7,17	7,58
PFPA (g)	10,51	9,18	10,88
PSPA (g)	2,36	2	2,21
PSR (g)	1,05	0,96	0,97

Tratamientos: S/I: sin inocular, I: inoculado, F: fertilizado
* indica diferencia significativa $p \leq 0,05$ respecto al Tratamiento de semilla sin inocular + 75% NPK (3)

Discusión

En las condiciones dadas para este experimento, la inoculación con RIZOVIV permitió disminuir los niveles de fertilización. Teniendo en cuenta la información brindada por el IPCC (2006), 1 Kg de fertilización N corresponde a una emisión de 10,5 kg de CO₂. En función a este dato y a los resultados obtenidos en nuestros ensayos, podemos indicar que la aplicación de RIZOVIV permitiría reducir la dosis de fertilizante y, por consiguiente, disminuir de 945 kg la emisión de CO₂ a 708,75 kg, correspondiendo esto a una disminución de emisiones que rondan los 236,25 kg, según

cálculos realizados bajo la metodología de Hungria *et al.* (2022). Teniendo en cuenta que el ensayo fue conducido bajo condiciones semi-controladas, proponemos realizar el mismo ensayo a campo para poder determinar si las respuestas observadas también se manifiestan en las condiciones agronómicas características del cultivo en estudio.

Bibliografía

- Cassán, F.D., Penna, C., Creus, C.M., Radovancich, D., Monteleone, E., de Salamone, I.G., ... and Cáceres, E.R. 2015. Protocol for the quality control of *Azospirillum* spp. inoculants. Handbook for *Azospirillum*: technical issues and protocols, 487-499.
- Di Salvo, L.P., García, J.E., Puente, M.L., Amigo, J., Anríquez, A., Barlocco, C., ... and Vallejo, D. 2021. The drop plate method as an alternative for *Azospirillum* spp viable cell enumeration within the consensus protocol of the REDCAI network. Revista Argentina de Microbiología.
- Hungria, M., Barbosa, J.Z., Rondina, A.B.L. and Nogueira, M.A. 2022. Improving maize sustainability with partial replacement of N fertilizers by inoculation with *Azospirillum brasilense*. Agronomy Journal, 114(5), 2969-2980.
- IPCC 2006. IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories. IPCC.
<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006>

Eficiencia agronómica y minería genómica de propiedades PGPR de la bacteria rizosférica biostimulante de trigo *Pseudomonas pergaminensis*

Marisa Díaz ¹, Teresa Bach ², Gustavo González Anta ³, Betina Agaras ⁴, Daniel Wibberg ⁵, Fabián Fabián ², Wilter Canciani ¹, Claudio Valverde ⁴

¹ Rizobacter Argentina S.A. – Pergamino - Buenos Aires - Argentina

² Profesional independiente

³ Universidad Nacional del Noroeste de Bs. As. (UNNOBA) – Pergamino - Buenos Aires – Argentina, Universidad Nacional de San Antonio de Areco (UNSAaA) – San Antonio de Areco - Buenos Aires – Argentina, Indrasa Biotecnología S.A. - Río Cuarto – Córdoba - Argentina

⁴ Laboratorio de Fisiología y Genética de Bacterias Beneficiosas para Plantas, Universidad Nacional de Quilmes, CONICET – Bernal - Buenos Aires - Argentina

⁵ Centro de Biotecnología (CeBiTec), Bielefeld University – Bielefeld – Germany
Contacto: mdiaz@rizobacter.com.ar, cvalver@unq.edu.ar

Resumen

Pseudomonas sp. cepa 1008 se aisló de la rizosfera de plantas de trigo cultivadas en campo en la etapa de macollamiento en una parcela agrícola cerca de la ciudad de Pergamino, Argentina. En base a su capacidad solubilizadora de fosfatos in vitro y la producción de AIA. La cepa 1008 fue formulada como un inoculante para la bacterización de semillas de trigo y sometida a múltiples ensayos de campo en el período 2010-2017. Mostró un fuerte impacto positivo en el rendimiento de grano (+8 % en promedio) a lo largo de varias campañas, con diferentes propiedades de suelo, genotipos de semillas y sin influencia significativa del tratamiento simultáneo de semillas con fungicida, lo que apoya firmemente el uso de esta bacteria bioestimulante como insumo agrícola para promover el rendimiento del trigo. La secuenciación completa del genoma reveló que la cepa 1008 tiene la capacidad de acceder a varias fuentes de fósforo inorgánico y orgánico, competir por la captación de hierro, producir auxina, 2,3-butanodiol y acetoína, y metabolizar GABA. Además, el genoma de la cepa 1008 alberga varios loci relacionados con la competitividad en la rizósfera, pero carece de grupos de genes relacionados con la producción de metabolitos secundarios típicos de biocontrol como si lo tienen otras cepas dentro del género *Pseudomonas*. Finalmente, el análisis comparativo filogenómico, fenotípico y quimiotaxonómico de la cepa 1008 con taxones relacionados sugiere fuertemente que este

aislado bioestimulante rizosférico de trigo es un representante de una nueva especie dentro del género *Pseudomonas*, para el cual asignamos el nombre *Pseudomonas pergaminensis* sp. nov. (cepa tipo 1008^T = DSM 113453^T = ATCC TSD-287^T).

Resultados

Aislamiento y caracterización

Se tomaron muestras de plantas de trigo cultivadas en campo en la etapa de macollamiento en una parcela agrícola cercana a la ciudad de Pergamino (provincia de Buenos Aires, Argentina (Figura 1a, b, c) para generar una colección de aislados de rizobacterias con potencial para ser formulados como insumo agrícola. Las suspensiones rizosféricas se sembraron en agar F de *Pseudomonas* y las colonias fluorescentes (Figura 1d) con diferentes características morfológicas se sometieron a un conjunto inicial de pruebas fenotípicas para retener a los candidatos de *Pseudomonas fluorescens* sobre la base del manual determinativo de Bergey. Luego de una evaluación adicional del potencial de solubilización de fosfato, se retuvo al aislado designado como 1008 para una caracterización adicional de las características que promueven el crecimiento de las plantas.

La cepa 1008 se seleccionó por su actividad solubilizadora de fosfato en placas de agar (Figura 1f, 1g; Tabla 1). En medio líquido Pikovskaya después de 24 h de crecimiento a 28 °C y 200 rpm, la cepa 1008 fue capaz de

solubilizar un promedio de 22 % del trifosfato de calcio insoluble (contenido final de P soluble de 45 mg P por 100 ml). También fue capaz de mineralizar P a partir de dos tipos de rocas fosfóricas (Rasaferil, Argentina; Encal, Chile) logrando un contenido final de P soluble de 46 mg P por 100 ml. Además de las fuentes insolubles de P, la cepa 1008 solubilizó zinc en un medio Pikovskaya modificado que contenía ZnO (Tabla 1)

La producción de compuestos similares al ácido indolacético (AIA) se detectó por primera vez cualitativamente como una reacción positiva al reactivo de Salkowski en células cultivadas en medio agarizado suplementado con triptófano. La producción de AIA se confirmó mediante análisis HPLC-MS/MS de cultivos líquidos. La cepa 1008 produjo AIA de manera dependiente del triptófano, alcanzando hasta 46,7 mg/100 ml después de 48 h de crecimiento. La producción de actividades extracelulares proteolíticas y de lecitinasa se reveló en ensayos de placa cualitativos. Los ensayos enzimáticos espectrofotométricos revelaron la producción de fosfatasa tanto ácida como alcalina, con una fracción importante de la actividad detectada en condiciones ácidas (586 μg p-nitrofenol/mg bacteria.h) de las cuales el 83 % se localizó intracelularmente. Por el contrario, el 82% de la actividad de fosfatasa alcalina total (10 μg p-nitrofenol/mg bacteria.h) se detectó en el sobrenadante del cultivo.

La cepa 1008 produjo compuestos quelantes de hierro solubles y difusibles detectados en placas CAS y no pudo crecer en ACC como la única fuente de C en medio definido, revelando así la falta de actividad de ACC desaminasa bajo las condiciones probadas (Tabla 1). Finalmente, la cepa 1008 no produjo cianuro de hidrógeno y no inhibió el crecimiento de una variedad de hongos fitopatógenos y oomicetos en placas de cultivo dual (Tabla 1).

Los cultivos puros de la cepa 1008 en medio NYB revelaron células polarmente flageladas típicas del género *Pseudomonas*, con dimensiones promedio de $1,9 \pm 0,4 \mu\text{m}$ de largo y $0,9 \pm 0,1 \mu\text{m}$ de ancho (Figura 1h). Las células mostraron en promedio 1 o 2 flagelos polares de hasta $10 \mu\text{m}$ de largo (Figura 1h). Curiosamente, la cepa 1008 mostró evidencia de variación de fase de colonia en medio sólido (Figura 1i-1m).

En resumen, la evaluación in vitro de las características que promueven el crecimiento de las plantas reveló que la cepa 1008 tenía características que pueden tener un impacto directo en el crecimiento de las plantas (como una mejora en la disponibilidad de P para las raíces de las plantas y la producción de AIA). Por esta razón, la cepa 1008 se formuló como inoculante para el tratamiento de semillas de trigo y se sometió a múltiples ensayos de campo para evaluar su desempeño como bioestimulante de plantas.

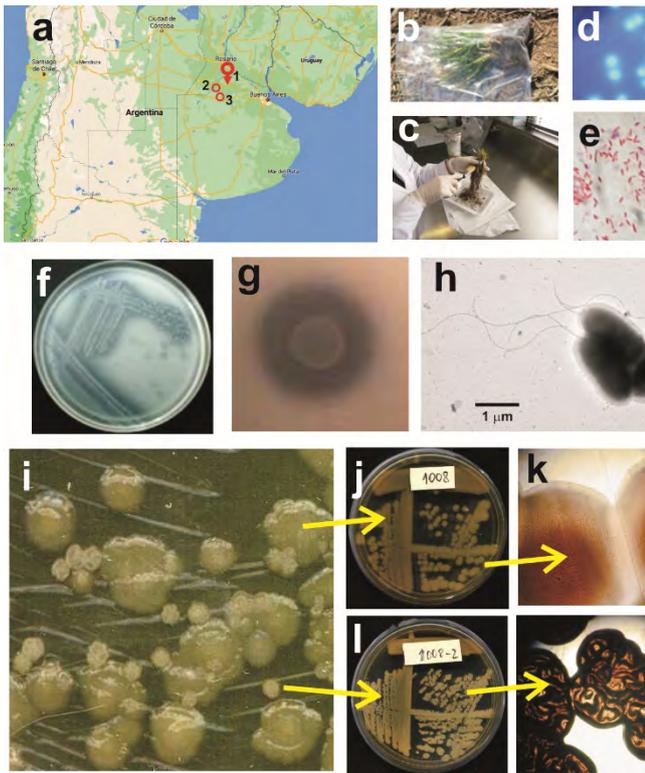


Figura 1. Figura 1. Aislamiento y caracterización microbiológica de *Pseudomonas* sp. cepa 1008. a) Ubicación geográfica y de los ensayos de campo experimentales para la evaluación del desempeño del inoculante a base de la cepa 1008 (1, Pergamino; 2, Ferré; 3, Junín). b) Plantas de trigo muestreadas en etapa de macollamiento. c) La tierra poco adherida del sistema de raíces con un cepillo. d) Colonias fluorescentes desarrolladas en agar F de *Pseudomonas* e) Tinción de Gram de células de un cultivo puro de la cepa 1008. f) Estriado de la cepa 1008 en agar Pikovskaya con trifosfato de calcio como fuente de P. g) Primer plano de una macrocolonia de la cepa 1008 y el halo de solubilización de trifosfato de calcio circundante en agar Pikovskaya. h) Microfotografía electrónica de transmisión que muestra células de la cepa 1008, flagelos con una ubicación polar típica. i) Variantes en fase de colonia de la cepa 1008 en placas de agar nutritivo. Las colonias más grandes corresponden a la variante de fase 1 (j, k) mientras que las colonias más pequeñas corresponden a la variante de fase 2 (l, m). El morfotipo de colonia de cada variante es claramente distinto bajo lupa (k, m).

Tabla 1. Rasgos promotores del crecimiento vegetal in vitro de *Pseudomonas* cepa 1008

Rasgo PGP (promotor del crecimiento de las plantas)	Resultado cualitativo (detectado + / no detectado -)
Solubilización de fosfatos	+
Solubilización de Zinc	+
Actividad de fosfatasa alcalina	+
Actividad de fosfatasa ácida	+
Producción de AIA inducida por triptófano	+
Actividad lecitinasa	+
Actividad exoproteasa	+
Secuestro de hierro en presencia de CAS	+
Actividad ACC deaminasa	-
Producción de cianuro de hidrógeno	-
Antagonismo de hongos fitopatógenos	-

Eficiencia agronómica en trigo

La cepa fue estudiada a través del tiempo por su capacidad para permanecer estable dentro de una formulación líquida que permitió garantizar su viabilidad al momento de su aplicación sobre las semillas. El inoculante registrado con el nombre comercial Rizofos® fue utilizado en 25 ensayos de campo en el período comprendido entre 2010-2017.

Al realizarse los análisis estadísticos de los datos de campo fueron tenidos en cuenta los factores adicionales que pudieron tener efectos sobre los tratamientos como son, la ubicación de los ensayos, las propiedades del suelo, los cultivos antecesores, los genotipos de semillas y el tratamiento simultáneo con fungicidas), ninguno de los cuáles tuvo efecto de interacción significativa con los tratamientos testigos o aquellos que recibieron el tratamiento con Rizofos®

En general, las variables que mejor respondieron con soporte estadístico al tratamiento de semillas con Rizofos® fueron rendimiento de grano (+8%), número de espigas (+5%) y peso fresco del macollo (+8%), de acuerdo con lo observado en la Tabla 2.

Tabla 2: Resultados de variables estudiadas

Variable	n	Control	+Rizofos®	SE	p-value
Rendimiento en grano (kg/ha)	150	4.084,4 ^a	4.423,8 ^b (+8,3%)	289,0	<0,0001
Número de plantas por m ²	150	n.s.	n.s.	n.s.	0,1874
Número de espigas por m ²	150	371,4 ^a	388,3 ^b (+4,6%)	37,3	0,0274
Número de macollos por m ²	114	n.s.	n.s.	n.s.	0,6314
NDVI en macollaje	*	*	*	*	*
Peso seco de macollos (g)	34	100,3 ^a	101,9 ^b	10,4	<0,0001
Peso fresco de macollos (g)	102	452,6 ^a	489,9 ^b (+8,2%)	43,9	0,0007
Peso fresco de espigas (g)	48	1.815,0 ^a	1.719,3 ^b	86,0	0,0019

MMLG, Test: LSD Fisher Alfa=0,05

Minería genómica de propiedades PGPR

Dentro de los estudios de biología molecular la secuenciación completa del genoma reveló que la cepa 1008 tiene la capacidad de acceder a diversas fuentes de fósforo inorgánico y orgánico, lo que le permite contribuir a la nutrición fosforada de las plantas; posee la capacidad de competir por el acceso al hierro, elemento que también es capaz de liberar y dejar disponible para las plantas en la zona de la rizósfera; de producir auxinas relacionadas con el desarrollo del sistema radicular y la formulación de pelos absorbentes, y de producir 2,3-butanodiol y acetoina, compuestos reportados en la literatura como biomoléculas relacionadas con la estimulación de los cultivos; por último, esta bacteria es capaz de metabolizar un compuesto liberado por la planta en condiciones de estrés denominado GABA, por lo cual también puede ejercer acción benéfica sobre las plantas, acompañándolas a sortear

situaciones ambientales negativas durante su ciclo de vida.

Además, el genoma de la cepa 1008 alberga múltiples regiones que contienen genes relacionados con su fuerte competitividad para establecerse de manera exitosa en la rizosfera (Figura 3).

Análisis filogenético

El análisis filogenómico, fenotípico y quimiotaxonómico de la cepa 1008 en comparación con taxones emparentados permitió concluir que este aislamiento bioestimulante rizosférico de trigo es un representante de una nueva especie dentro del género *Pseudomonas*, para la cual se propuso y fue aceptada la denominación *Pseudomonas pergaminensis* sp. nov. (cepa tipo 1008T = DSM 113453T = ATCC TSD-287T) (Figura 4)

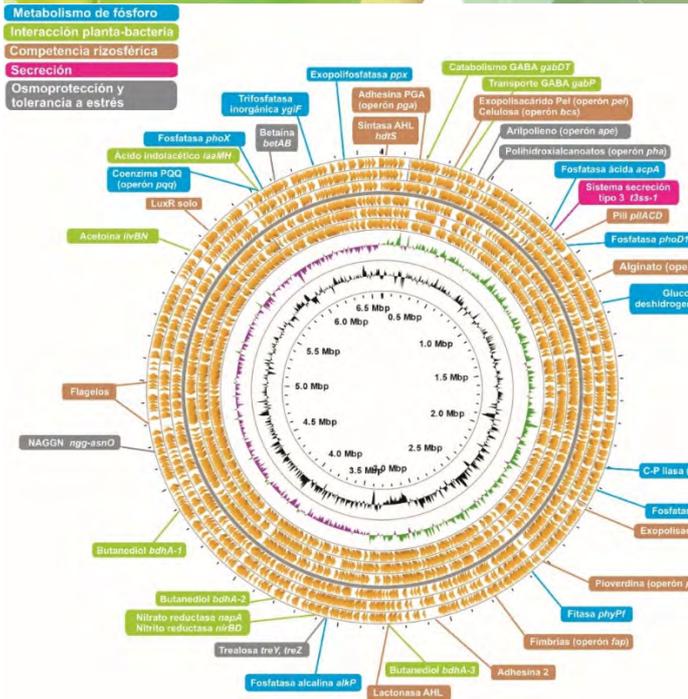


Figura 3. Esquema de la ubicación de genes relacionados con características PGPR

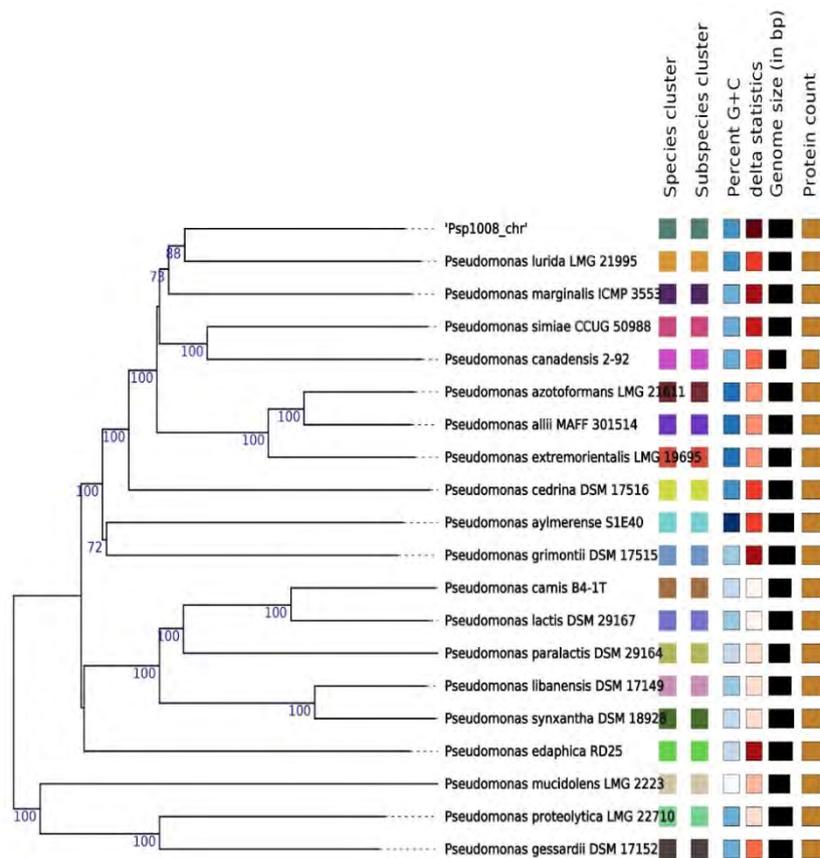


Figura 4. Árbol de Filogenia de Distancia Genoma BLAST (GBDP) de *Pseudomonas* sp. cepa 1008. El árbol filogenético se construyó con Type (Strain) Genome Server (Meier-Kolthoff and Göker, 2019)

Conclusiones

- ✓ Hemos caracterizado microbiológica, fisiológica y genómicamente una cepa

rizosférica de trigo representativa de una nueva especie propuesta con el nombre *Pseudomonas pergaminensis*.

- ✓ Se encontró un fuerte efecto positivo de *Pseudomonas pergaminensis* en el rendimiento del cultivo de trigo, demostrado a través de ensayos de campo, con la aplicación a semillas hasta 15 días antes de la siembra.
- ✓ Las características observadas in vitro, en planta y a través de análisis genómicos

sugieren fuertemente que la cepa 1008 actúa como bioestimulante de plantas. La información completa del genoma es de suma utilidad para profundizar en los mecanismos promotores del crecimiento de las plantas de esta bacteria y potenciar sus características haciendo un producto bioestimulante de calidad.

Diagnóstico de la deficiencia azufrada en cebada cervecera basado en el análisis vegetal

Gómez, F.M. ¹, P. Prystupa ^{1,2}, L.G. Abeledo ³, J.J. Boero ⁴, G. Ferraris ⁵, F.H. Gutiérrez-Boem ^{1,2}

1 Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, CABA, Argentina; 2 INBA-CONICET; 3 Cátedra de Cerealicultura, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, CABA, Argentina. IFEVA-CONICET; 4 Departamento de tecnología, Cátedra de Genética y Mejoramiento, Universidad Nacional de Luján, Luján, Buenos Aires, Argentina; 5 EEA Pergamino, INTA.

fgomez@agro.uba.ar

Resumen

La concentración de S, la relación N:S y las curvas de dilución de S son herramientas de diagnóstico de deficiencia azufrada basadas en tejido vegetal. El objetivo del presente trabajo fue evaluar varios métodos de diagnóstico de deficiencia azufrada basadas en tejido vegetal en el cultivo de cebada cervecera: la concentración de S y la relación N:S tanto en grano como en biomasa aérea, y las curvas de dilución de S y de la relación N:S. Para ello, se realizaron 50 experimentos en lotes de producción en el centro-norte de la provincia de Buenos Aires. Los tratamientos aplicados fueron: 1. Productor (sin agregado de fertilizante adicional al realizado por el productor), 2. +S: sin limitaciones de S, 3. +N: sin limitaciones de N, 4. +NS: sin limitaciones de N y S. La relación N:S fue la variable que permitió una mejor distinción de los cultivos deficientes en S de aquellos que no lo eran. Las curvas de dilución de S y de la relación N:S no permitieron una adecuada caracterización de los cultivos deficientes en S.

Palabras clave: relación N:S, concentración de S en grano, concentración de N en grano, curva de dilución de S.

Introducción

Los nutrientes que más frecuentemente limitan la producción de cultivos de granos en la región pampeana son el N y el P (Lavado & Taboada, 2009). En los últimos 20 años las deficiencias de S en distintos cultivos de grano se han vuelto más frecuentes (Reussi Calvo et al., 2011; Salvagiotti et al., 2012; Carciochi et al., 2016). Entre las herramientas de diagnóstico de deficiencia nutricional se encuentran los métodos basados en determinaciones realizadas en el tejido vegetal, como son las relaciones

entre nutrientes o las curvas de dilución de biomasa. La relación N:S en grano ha sido propuesta como herramienta de diagnóstico en trigo (Randall et al., 1981; Reussi Calvo et al., 2011), soja (Salvagiotti et al., 2012) y maíz (Carciochi et al., 2019a). Respecto a las curvas de dilución de S hay menos información y, hasta el conocimiento de los autores, solo se ha reportado en el cultivo de trigo (Reussi Calvo et al., 2012; De Oliveira Silva et al., 2021) y maíz (Carciochi et al., 2019b).

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la concentración de S en grano, la relación N:S en grano y las curvas de dilución de S y de la relación N:S como herramientas de diagnóstico de deficiencia azufrada en el cultivo de cebada cervecera.

Materiales y métodos

Se realizaron 50 experimentos con cebada cervecera (*Hordeum vulgare* L.) en condiciones de campo en el centro-norte de la provincia de Buenos Aires, durante el periodo entre 2014 y 2018. Se aplicaron tres tratamientos de fertilización: Productor (consistió en la dosis de fertilización aplicada por el productor), +S (15 kg S ha⁻¹ o 20 kg S ha⁻¹ adicionales a la dosis de fertilizante aplicada por el productor), +N (150 kg N ha⁻¹ o 250 kg N ha⁻¹ adicionales a la dosis de fertilizante aplicada por el productor). Durante el periodo 2016 a 2018, se agregó el tratamiento +NS (15 kg S ha⁻¹ o 20 kg S ha⁻¹ y 150 kg N ha⁻¹ o 250 kg N ha⁻¹ adicionales a la dosis de fertilizante aplicada por el productor) con el fin de conformar un diseño factorial completo. Las prácticas de manejo implementadas en los experimentos fueron aquellas realizadas por cada productor en el lote de producción.

En anthesis y madurez del cultivo, se cosecharon 4 m lineales de biomasa aérea y fueron secadas a 65 °C hasta alcanzar peso

constante. Las muestras de madurez del cultivo fueron trilladas para determinar rendimiento en grano y rastrojo. El rendimiento en grano fue corregido a un contenido de humedad de $0.13 \text{ g H}_2\text{O g}^{-1}$. En muestras de biomasa aérea en antesis, rastrojo y grano, se determinó la concentración de N y de S. Tanto para N como S, el contenido de nutriente en biomasa aérea en antesis, en rastrojo y grano fue calculado como el producto de la concentración de N o S y la cantidad de biomasa aérea en antesis, rastrojo y grano. La cantidad de N y S absorbido a la madurez del cultivo se calculó como la suma del contenido de N o S en grano y rastrojo. La relación N:S en grano y en biomasa aérea en antesis se calculó como el cociente entre la concentración de estos nutrientes en el grano y en la biomasa aérea, respectivamente. La relación N:S en biomasa aérea en madurez se calculó como el cociente entre la cantidad de N y S absorbido.

El rendimiento relativo (RR) se calculó como el cociente entre el rendimiento en grano obtenido en los tratamientos no fertilizados con S (i.e. 'Productor' y '+N') y el rendimiento en grano de los tratamientos fertilizados con S (i.e. '+S' y '+NS'), en cada experimento.

La clasificación de cultivos en deficientes y suficientes en S se realizó a partir de un test formal a través de comparación de medias para cada experimento (comparación de tratamientos '+NS' vs. '+N' y '+S' vs. 'Productor', en cada experimento).

La evaluación de las distintas variables como herramienta de diagnóstico de deficiencia

azufrada se realizó a través de la correspondencia entre la variable evaluada y el aumento en el rendimiento en grano frente al agregado de S (determinado a través del mencionado test formal). En el caso de la clasificación a partir de la metodología de Cate & Nelson (1971), se consideró como cultivos deficientes a aquellos que poseían un valor de la variable evaluada inferior al umbral crítico determinado por esta metodología.

Resultados y discusión

La relación N:S fue la variable que presentó una mayor proporción de veces un adecuado diagnóstico de la deficiencia S (5 de 8 cultivos deficientes) tanto en biomasa aérea en antesis y madurez como en grano (Fig. 1.c, f, i). Cabe destacar que los cultivos deficientes en S que no presentaron fertilización con N, fueron diagnosticados como cultivos suficientes en S en la mayoría de los casos (i.e. con la excepción de un cultivo a partir de la concentración de S en biomasa aérea en madurez, Fig. 1.d).

La utilización en conjunto de la concentración de S y la relación N:S en los distintos órganos y momentos no produjo una mejora significativa de la capacidad de diagnóstico de la deficiencia azufrada de estas variables individualmente (i.e. los cultivos deficientes correctamente evaluados fueron ~ 4 de 8) (Fig. 2).

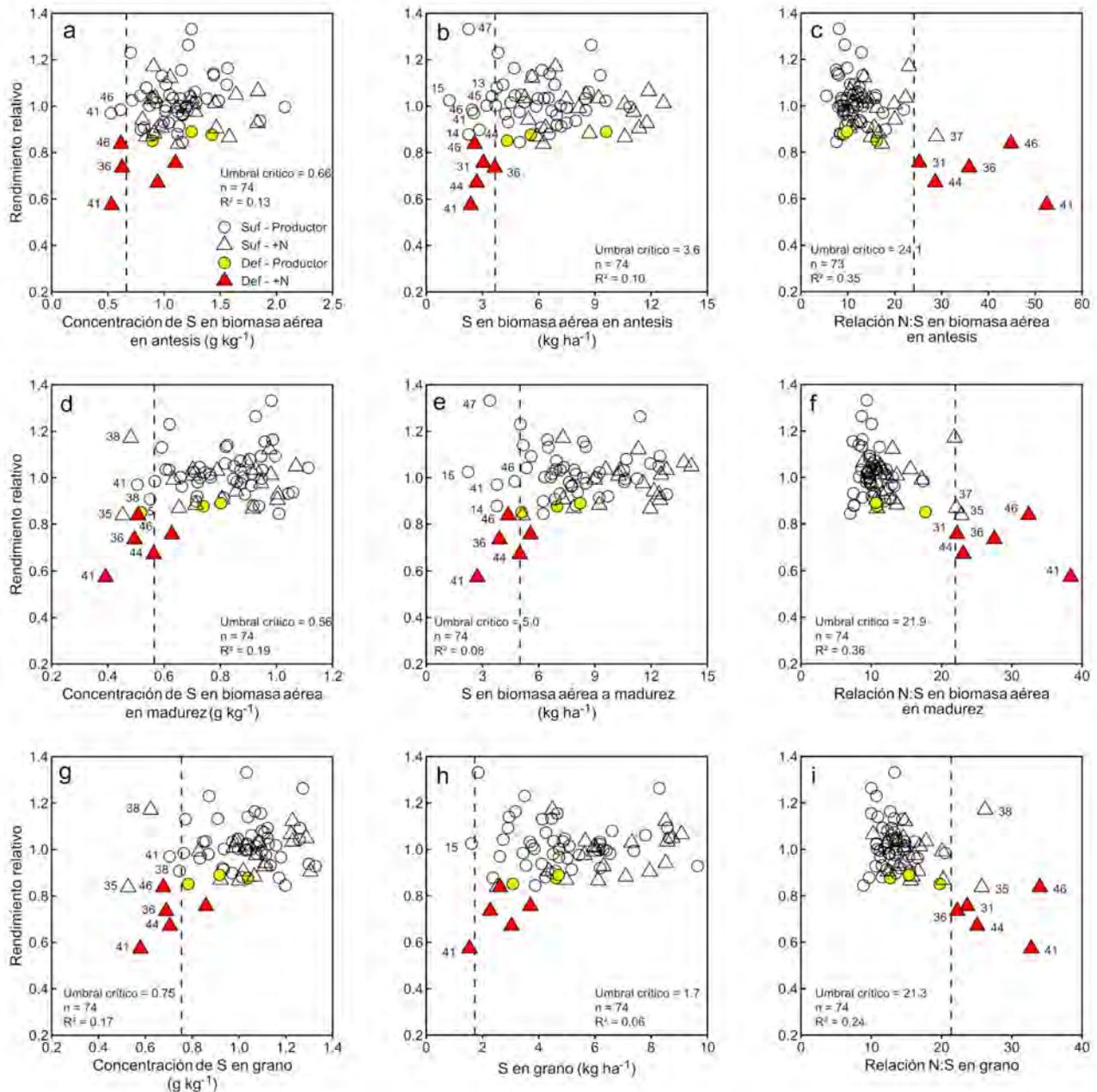


Figura 1. Relación entre el rendimiento en grano relativo y la concentración de S (panel izquierdo), contenido de S (panel medio) y relación N:S (panel derecho) en distintos órganos vegetales y estados fenológicos. a), b) y c) corresponden a biomasa aérea en anthesis, d), e) y f) corresponden a biomasa aérea en madurez y g), h) e i) corresponden a grano. La forma de los símbolos refiere al tratamiento utilizado para calcular el RR (los círculos corresponden al tratamiento 'Productor' y los triángulos al tratamiento '+N'). Los colores de los símbolos refieren al estatus azufrado del cultivo establecido mediante los contrastes entre tratamientos (los símbolos vacíos corresponden a los cultivos suficientes y los símbolos llenos a los cultivos deficientes en S). Los símbolos anaranjados corresponden a cultivos con agregado de N, mientras que los amarillos corresponden a cultivos sin agregado de N adicional al realizado por el productor. Las líneas verticales discontinuas corresponden a los valores críticos determinados para las distintas variables evaluadas. Los números ubicados junto a los símbolos corresponden a la denominación del experimento en aquellas situaciones que se encuentran en la zona de deficiencia para cada variable evaluada, a partir de Cate y Nelson (1971).

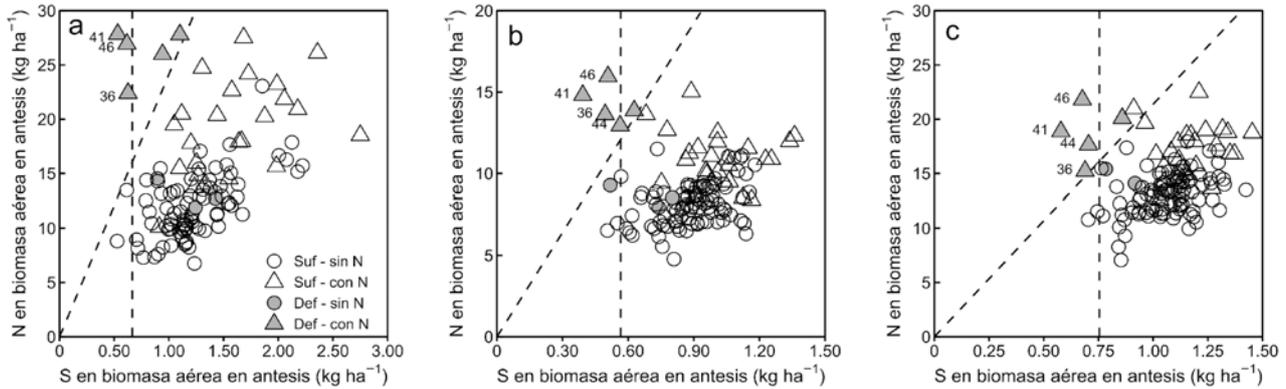


Figura 2. Relación entre la concentración de N y la concentración de S en a) biomasa aérea en antesis, b) biomasa aérea en madurez, c) grano. Los colores de los símbolos refieren al estatus azufrado de los cultivos (los símbolos grises corresponden a cultivos deficientes en S, mientras que los símbolos vacíos corresponden a cultivos suficientes en S). La forma de los símbolos refiere a la condición de fertilización con N del cultivo (los círculos corresponden a cultivos sin fertilización con N, mientras que los triángulos corresponden a cultivos fertilizados con N). Las líneas discontinuas indican los valores críticos para cada variable (concentración de S y relación N:S) determinados a partir de Cate & Nelson (1971).

La relación estequiométrica N-S fue mayor en cultivos deficientes en S respecto a aquellos que no lo son. Cabe destacar que la principal diferencia entre grupos deficientes y no deficientes en S se debe a los cultivos con agregado de N (Fig. 3). Por otro lado, los cultivos

deficientes en S presentaron mayor variabilidad respecto a aquellos que no lo son (i.e. $R^2 = 0.38$ en biomasa aérea en antesis y $R^2 \sim 0.20$ en biomasa aérea en madurez y grano, Fig. 3). Esto probablemente estuvo asociado a la baja cantidad de cultivos con esta característica.

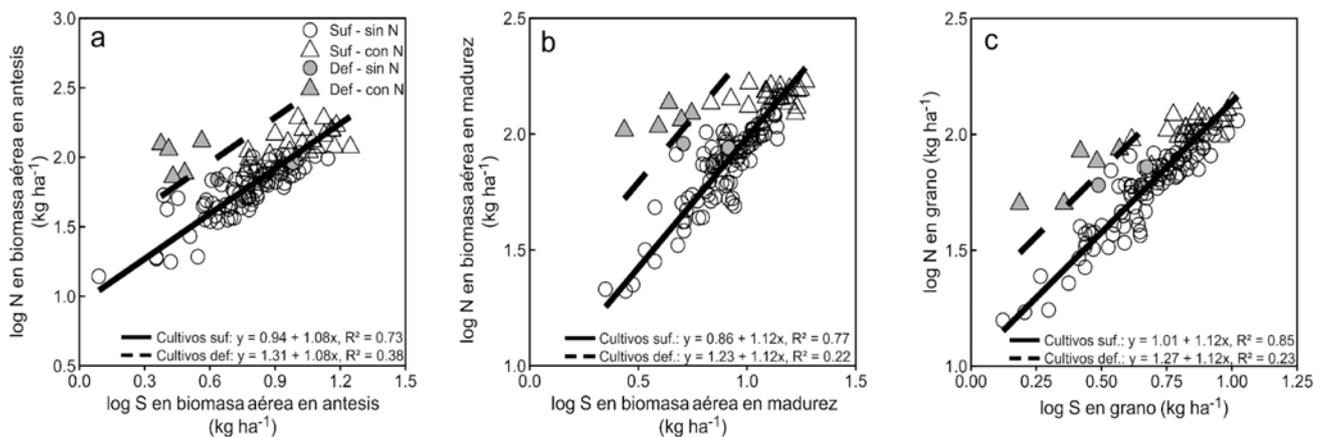


Figura 3. Relaciones estequiométricas N-S en a) biomasa aérea en antesis, b) biomasa aérea en madurez y c) grano. Los colores de los símbolos refieren al estatus azufrado del cultivo establecido mediante la comparación de medias (los símbolos vacíos corresponden a los cultivos suficientes y los símbolos llenos a los cultivos deficientes).

Las curvas de dilución de S no permitieron distinguir a los cultivos deficientes en S de aquellos que no lo son. Incluso, entre los cultivos con una concentración de S en biomasa de correspondientes al cuantil 25 (i.e. aquellos con una concentración de S en biomasa igual o inferior al 25 % más bajo de la población) se observaron cultivos suficientes en S (Fig. 4.a). Todos los cultivos evaluados en el presente estudio se ubicaron en la zona de suficiencia de S

determinada a partir de otros trabajos previos (Reussi Calvo et al., 2012; De Oliveira Silva et al., 2021) (Fig. 4.a). La curva de dilución de la relación N:S en biomasa no permitió tampoco

distinguir adecuadamente los cultivos deficientes de los suficientes en S, ni siquiera aquella curva que separa a los valores de relación

N:S pertenecientes al decil superior (i.e. Q90, Fig. 4.b).

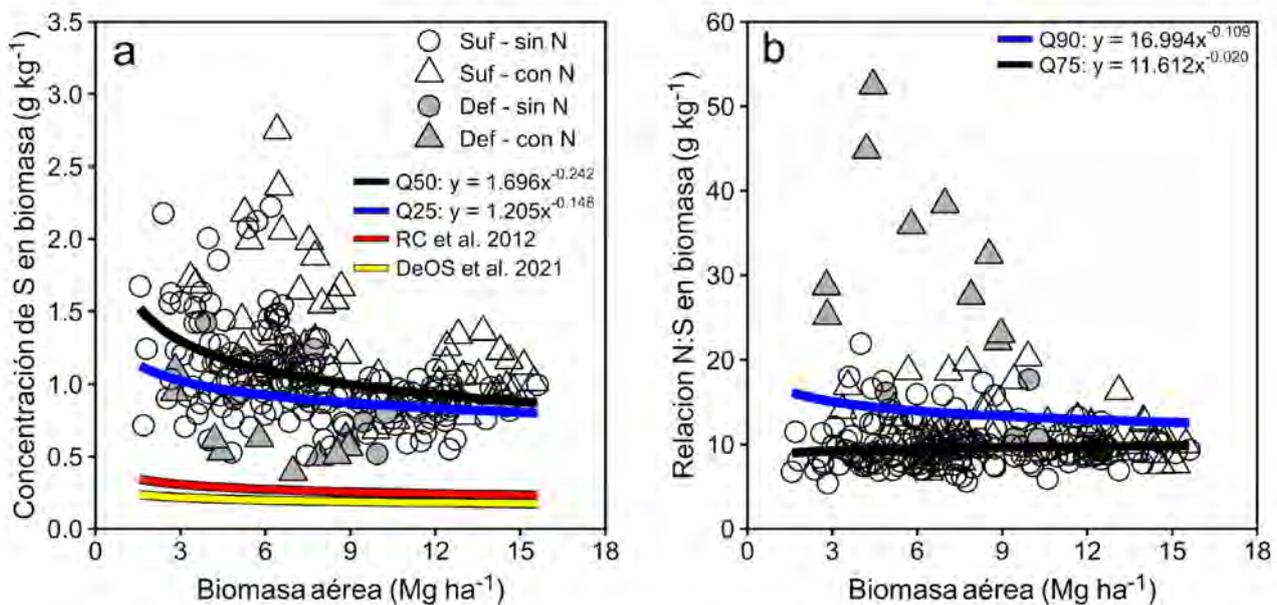


Figura 4. a) Relación entre la concentración de S en biomasa aérea y la biomasa aérea, b) la relación N:S en biomasa aérea y la biomasa aérea. En a) la función 'RC et al. 2012' corresponde a la función ajustada por Reussi Calvo et al. (2012) $y = 0.37 * \text{Biomasa área}^{-0.169}$, mientras que la función 'DeOS et al. 2021' corresponde a la función ajustada por De Oliveira Silva et al. (2021) $y = 0.25 * \text{Biomasa área}^{-0.13}$.

Conclusiones

La relación N:S fue la variable que permitió una correcta evaluación de cultivos deficientes en S en los distintos órganos (biomasa aérea y grano) y momentos (antesis y madurez) evaluados. Las curvas de dilución de S podrían no tener una aplicación generalizada.

Referencias

Carciochi, W.D.; Reussi Calvo, N.I.; Wyngaard, N.; Divito, G.A.; Eyherabide, M.; Echeverría, H.E. 2019a. Prognosis and diagnosis of sulfur status in maize by plant analysis. *European Journal of Agronomy*, 108, 1-10.

Cate, R.B.; Nelson, L.A. 1971. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. *Soil Science Society of America Journal*, 35: 658-660.

Carciochi, W.D.; Wyngaard, N.; Reussi Calvo, N.I.; Pagani, A.; Divito, G.A.; Echeverría, H.E.; Ciampitti, I.A. 2019b. Critical Sulfur

Dilution Curve and Sulfur Nutrition Index in Maize. *Agronomy Journal*, 111: 448-456.

Carciochi, W.D.; Wyngaard, N.; Divito, G.A.; Reussi Calvo, N.I.; Cabrera, M.L. & Echeverría, H.E. 2016. Diagnosis of sulfur availability for corn based on soil analysis *Biology and Fertility of Soils*, 52: 917-926.

De Oliveira Silva, A.; Jaenisch, B.R.; Ciampitti, I.A.; Lollato, R.P. 2021. Wheat nitrogen, phosphorus, potassium, and sulfur uptake dynamics under different management practices. *Agronomy Journal*, 113: 2752-2769.

Lavado, R.S. & Taboada, M.A. 2009. The Argentinean Pampas: A key region with a negative nutrient balance and soil degradation needs better nutrient management and conservation programs to sustain its future viability as a world agresource. *Journal of Soil and Water Conservation*, 64: 150A-153A.

Randall, P.; Spencer, K.; Freney, J. 1981. Sulfur and nitrogen fertilizer effects on wheat. I. Concentrations of sulfur and nitrogen and the nitrogen to sulfur ratio in grain, in

relation to the yield response. *Crop and Pasture Science*, 32: 203-212.

Reussi Calvo, N.; Echeverría, H.; Sainz Rozas, H.S. 2011. Diagnosing sulfur deficiency in spring red wheat: Plant analysis. *Journal of Plant Nutrition*, 34: 573-589.

Salvagiotti, F., Ferraris, G., Quiroga, A., Barraco, M., Vivas, H., Prystupa, P., Echeverría, H.,

Gutiérrez Boem, F. H. (2012). Identifying sulfur deficient fields by using sulfur content; N:S ratio and nutrient stoichiometric relationships in soybean seeds. *Field Crops Research*, 135: 107-115.

Fertilización de verdeos invernales con énfasis en avena

Pautasso, J. M.^{1,2}; Barbagelata, P. A.^{1,2}; Giordano, M.²; Giacinti, S.³

¹ AER INTA Diamante; ² FCA UNER; ³ asesor privado.
Correo electrónico: pautasso.juan@inta.gob.ar

Introducción

La avena (*Avena sativa* y *A. bizantina*) es el verdeo invernal más importante en la región pampeana. Su amplia difusión se debe a la plasticidad del cultivo, tanto en lo que hace a los ambientes que ocupa como a la diversidad de usos y tipos de productos que pueden obtenerse: grano, forraje verde, forraje conservado (heno y ensilaje), doble propósito (forraje y grano), y en los últimos años su uso como cultivo de cobertura (Dietz y col. 2016; Bertolotto y Marcetti, 2017).

En Argentina se cultivan aproximadamente 1,5 millones de hectáreas de avena, destinándose la mayor parte para uso forrajero. En Entre Ríos se concentra alrededor del 5% de esta superficie (MAGyP; 2023).

La mayoría de los sistemas ganaderos del país tienen en su alimentación una base pastoril, donde los verdeos invernales cumplen un rol importante ofreciendo forraje de alta calidad en períodos relativamente cortos, complementando los períodos de baja producción de las pasturas perennes.

La bibliografía nacional cita principalmente al fósforo (P) y al nitrógeno (N) como los nutrientes limitantes, siendo la respuesta al agregado de nutrientes en los verdeos de invierno mayor que los verdeos de verano (Marino y Berardo, 2014).

La intensificación de los sistemas ganaderos determina una exportación más elevada de nutrientes del suelo, lo que requiere, en la mayoría de los casos, incrementos en los niveles de fertilización y podría provocar en estos sistemas la manifestación de deficiencias de otros nutrientes, además del P y del N.

Con el objetivo de validar las recomendaciones de fertilización con P y N para avena y diagnosticar posibles deficiencias de otros nutrientes (azufre, potasio y zinc) se realizaron ensayos en campos de productores.

Materiales y Métodos

Durante las campañas 2021 y 2022 se instalaron 8 ensayos de fertilización en sectores homogéneos de lotes comerciales de avena destinada a la producción de forraje. El diseño fue en bloques completamente aleatorizados, con tres repeticiones y se evaluaron los siguientes tratamientos:

- ✓ T0: Testigo sin fertilización.
- ✓ T1 (N): 92 kg de N por hectárea.
- ✓ T2 (NP): 92 kg de N + 20 kg de P por hectárea.
- ✓ T3 (NPS): 92 kg de N + 20 kg de P + 10 kg de S por hectárea.
- ✓ T4 (NPSK): 92 kg de N + 20 kg de P + 10 kg de S + 50 kg de K por hectárea.
- ✓ T5 (NPSKZn): 92 kg de N + 20 kg de P + 10 kg de S + 50 kg de K + 1 kg Zn por hectárea.

Previo a la fertilización, se extrajeron muestras de suelos de 0-20 cm. La fertilización se realizó al voleo en el momento de la siembra. Cada unidad experimental (parcela) fue de 2 metros de ancho por 5 metros de largo. Previo a los pastoreos se realizó un muestreo de 0,25 m² en cada parcela, con cortes a 5 cm de altura para estimar disponibilidad total de forraje, las muestras se pesaron y llevaron a estufa a 60 °C durante 48 h, luego se pesaron nuevamente para estimar el contenido de materia seca (% MS).

El rendimiento relativo (RR) se calculó, para cada nutriente, dividiendo el rendimiento del tratamiento testigo por el rendimiento tratado (o por el testigo si este era el máximo del boque).

El nitrógeno disponible (ND) se calculó como la suma del N de nitratos (0-20 cm) en kg ha⁻¹ más el agregado de N de los fertilizantes.

Se utilizaron bases de datos anteriores (Pautasso y col., 2020; Pautasso y Quinodoz, 2018; Pautasso y col., 2022) para comparar los resultados y expresarlos como una sola población, si el error de los modelos no se incrementaba en el modelo combinado vs los modelos separando las bases de datos.

Para obtener los valores críticos de análisis de suelo para rendimiento relativo (%), los cálculos fueron realizados de dos maneras, según los nutrientes analizados (se informa el modelo que tuvo mayor ajuste): i) mediante el ajuste de modelos de respuesta lineal y meseta, mediante con la subrutina Solver del programa Microsoft® Excel y ii) la curva de calibración arco seno logaritmo (ALCC) modificado por Correndo et al. (2017). Para comparar modelos se realizó una prueba de “F” (Mead et al., 1993). Para comparar medias, se utilizó el paquete estadístico Infostat 2020 (Di Rienzo et al. 2020). Se realizaron análisis de variancia de las variables para el conjunto de los experimentos,

anidando los bloques dentro de los sitios (ANOVA “Multisitio”).

Resultados y Discusión

Sitios y datos generales (Tabla 1):

Los suelos de los sitios experimentales son representativos de la zona. Las variables de suelos analizadas presentaron una gran dispersión para la mayoría de los parámetros medidos.

El número de cortes de avena difirió entre sitios, dependiendo del uso del verdeo que realizaba el productor.

Tabla 1: Análisis de suelos (0-20 cm) de los sitios, fecha de siembra y número de cortes.

Depto.	Ensayo	Año	Siembra	Suelo	Nº de Cortes	pH	MO (%)	NO ₃	P Bray	SO ₄ ⁻²	K	Zn
			Fecha					Ppm				
Paraná	1	2021	7-abr	Argiudol ácuico	1	6.6	5.1	91.6	66.8	10.9	922	0.7
Paraná	2	2021	7-abr	Argiudol ácuico	1	6.6	5.1	91.6	66.8	10.9	922	0.7
Paraná	3	2021	20-abr	Peluderte árgico	1	6.2	5.4	43.8	24.6	10.7	414	0.7
Diamante	4	2021	24-mar	Argiudol ácuico	2	6.6	3.2	26.6	11.8	8.6	391	0.5
Nogoyá	5	2021	19-mar	Argiudol vértico	3	6.1	5.4	152.7	16.8	17.0	362	0.8
Diamante	6	2022	1-abr	Argiudol ácuico	2	5.8	3.6	75.7	33.5	8.3	312	0.9
Paraná	7	2022	19-abr	Peluderte árgico	2	6.1	5.3	57.5	10.4	9.0	312	0.6
Paraná	8	2022	4-abr	Argiudol vértico	2	6.8	3.98	113.3	85.2	12.5	819	2.4
Promedio			4-abr		1.8	6.4	4.6	81.6	39.5	11.0	557	0.9

La distribución de los sitios se puede observar en el Mapa (Figura 1).



Figura 1. Mapa del Centro-Oeste de la provincia de Entre Ríos con la distribución de los sitios experimentales.

Producción de materia seca, análisis ANOVA “Multisitio”

En la Tabla 2 se informa el ANOVA “Multisitio”. Al haber interacción “Tratamiento*Sitio” no se puede evaluar el impacto del agregado de nutrientes en conjunto, sino desagregando por sitio o buscando relaciones de las respuestas según las variables de suelos medidas en cada sitio, que fue lo que se hizo.

Tabla 2: Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III) "Multisitio"

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	(Error)
Modelo	686427575	63	10895676	13.3	<0.0001	
Sitio	517548689	7	73935527	45.5	<0.0001	(Sitio>Bloque)
Tratamiento	98115046	5	19623009	24.0	<0.0001	
Sitio>Bloque	25992095	16	1624506	2.0	0.02	
Sitio*Tratamiento	44771746	35	1279193	1.6	0.05	
Error	65339904	80	816749			
Total	751767479	143				

Respuesta al agregado de N

Para estimar la respuesta y el umbral de ND se tomaron los tratamientos que también recibieron 20 kg/ha de P, asegurando que la respuesta a este nutriente no estuviera limitada por una posible deficiencia de P.

La respuesta promedio al agregado de N (sin limitación de P) fue de 2075 kg MS ha⁻¹ (60% más que el testigo); pero en el análisis de los rendimientos ANOVA conjunto de los ensayos hubo interacción "Sitio*Tratamiento con N" (p= 0.007), por lo que se relacionaron los RR con la variable compuesta de ND.

En la Figura 2 (A; B y C) se informan los umbrales de ND (0-20 cm). La Figura 2 A corresponde al umbral estimado con el set de ensayos del presente trabajo y la Figura 2 B al trabajo donde se evaluaron un número mayor de ensayos y ya están publicados (Pautasso y col.; 2020). Al no incrementarse el error del modelo

combinado (Tabla 3) todos los datos fueron analizados como una sola población (Figura 2 C).

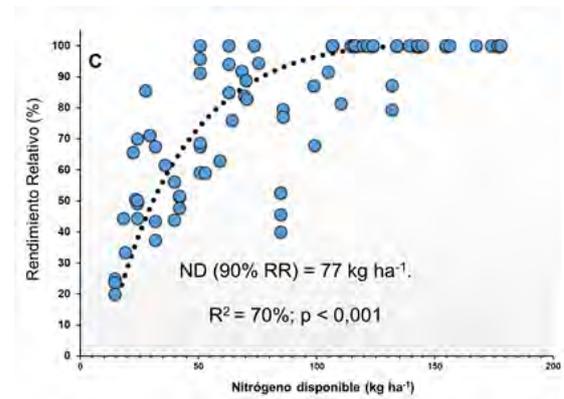
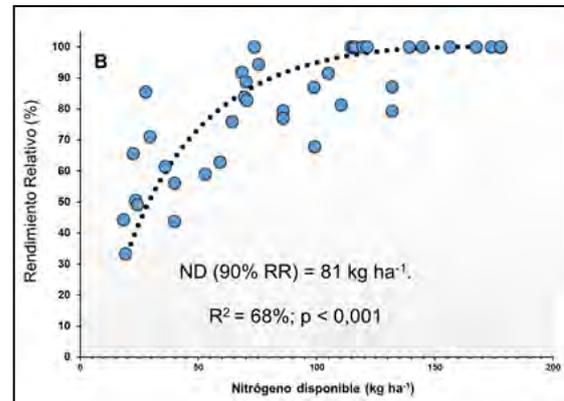
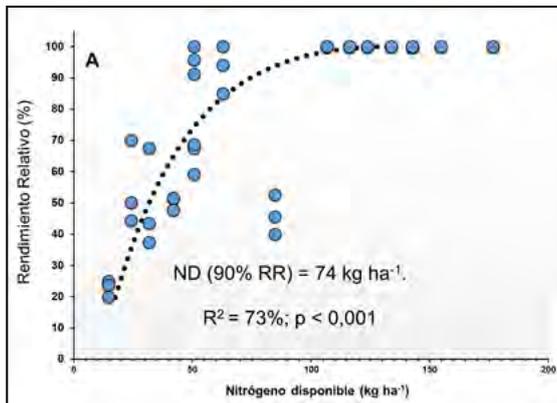


Figura 2: Rendimiento relativo de MS en función del nitrógeno disponible (0-20 cm); A) Modelo del presente trabajo; B) Modelo con datos de Pautasso y col. (2020); C) Modelo combinado.

Tabla 3: Análisis de la variación del error entre el modelo completo y el combinado y de la significancia de la diferencia entre dos modelos.

	SCE	GL	CME	Valor F	Valor P
Presente trabajo	7.3	46			
Pautasso y col.;2020	6.2	37			
Modelo Completo (dos modelos)	13.5	83	0.16		
Modelo Completo (un modelo)	13.8	85			
Diferencia entre Modelos	0.3	2	0.13	0.82	0.44

Los umbrales estimados con modelos lineal y meseta no presentan grandes diferencias con los calculados con la metodología arco seno logaritmo y los ajustes fueron superiores con esta última metodología (para el modelo combinado el R² lineal y meseta: 63%). El umbral de 77 kg de ND ha⁻¹ está dentro del rango informado por Prystupa (2014) que informa, para avenas cultivadas con destino a grano, un rango del umbral entre 75 y 82 kg ha⁻¹.

Respuesta al agregado de fósforo (P)

En la Tabla 4 se informa el ANOVA "Multisitio" (con todos los sitios de avena). A pesar de la variabilidad del P Bray de los suelos no se encontró interacción significativa "Sitio*Tratamiento con P" (p= 0.07). Para este set de ensayos, el agregado de P incrementó el rendimiento un 12% (Figura 3).

Tabla 4: Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III) "Multisitio" comparación tratamientos N vs NP.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	(Error)
Modelo	229525301	31	7404042	11.5	<0.0001	
Sitio	190716240	7	27245177	18.3	<0.0001	(Sitio>Bloque)
Tratamiento	4116651	1	4116651	6.4	0.0223	
Sitio>Bloque	23810540	16	1488159	2.3	0.05	
Tratamiento*Sitio	10881870	7	1554553	2.4	0.07	
Error	10285892	16	642868			
Total	239811193	47				

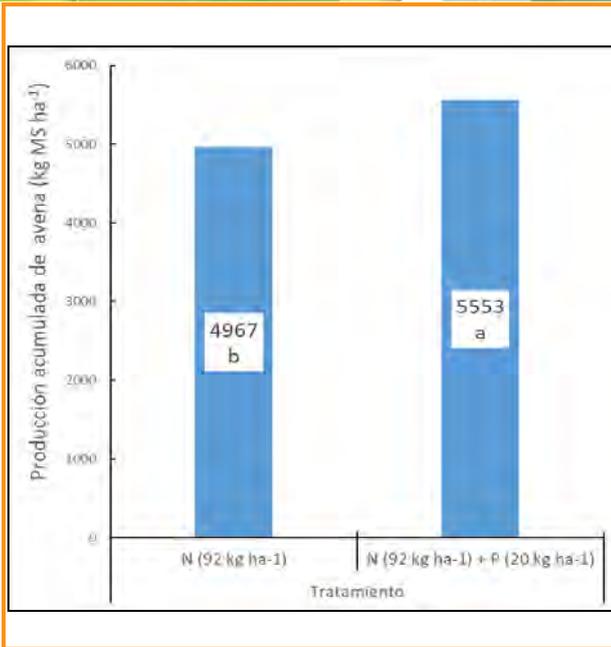


Figura 3: Producción acumulada de avena en función del agregado de P. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Para lograr una calibración más confiable del umbral de P Bray se incorporaron en el modelo otros verdes invernales a partir de datos publicados de respuesta a P en raigrás (Pautasso y Quinodoz; 2020), más un ensayo de fertilización en cebada forrajera realizado en el año 2022 (no publicados). Se muestra el modelo obtenido con la metodología lineal y meseta (Figura 4), ya que el ajuste con la metodología arco seno logaritmo fue inferior (R^2 : 32%).

El umbral de P Bray hallado está por encima del que habitualmente se recomienda en la región, que es de 15 ppm para pasturas de gramíneas (Rubio y col.; 2012); umbral muy similar al señalado para el manejo del P en cultivos de gramíneas para granos. Una explicación posible del mayor valor de P Bray en los verdes podría estar relacionado al fenómeno de removilización de nutrientes y reservas desde hojas inferiores de nutrientes móviles en la planta como el P (que compensa deficiencias en cultivos de granos con la consecuente senescencia anticipada de hojas), siendo este un proceso “no querido” en forrajeras, donde el objetivo es “cosechar” la mayor cantidad y calidad de MS.

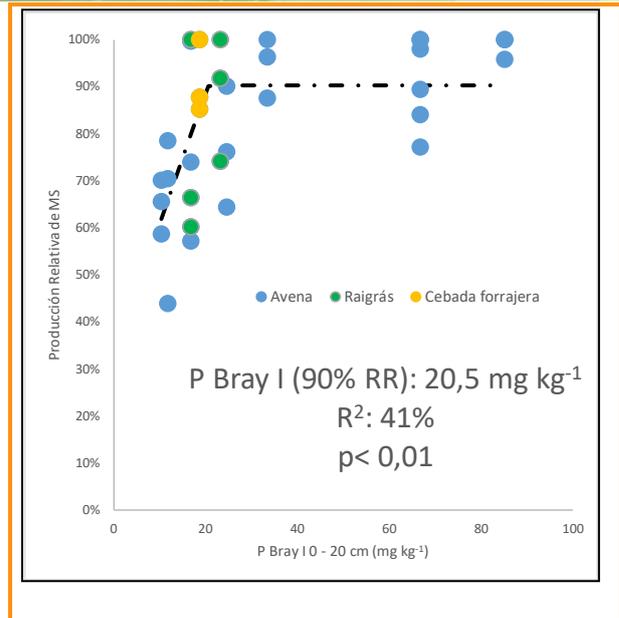


Figura 4: RR de verdes de invierno en función del P Bray del suelo 0–20 cm.

Respuesta al agregado de azufre (S); potasio (K) y cinc (Zn)

En el ANOVA donde se incluyeron todos los sitios y se compararon los tratamientos NP-NPS-NPSK y NPSKZn, no se encontró efecto significativo de los tratamientos ($p= 0,38$), ni interacción “Sitio*Tratamiento” ($p= 0,77$) (Figura 5). Este resultado permite suponer que para los sitios evaluados no hay ventajas en el agregado de otros nutrientes además de N y P.

En el presente trabajo el agregado de S no tuvo impacto productivo. Para el manejo de S, los métodos basados en la determinación de S de sulfatos (0-20) han mostrado resultados contradictorios (Wyngaard y Reussi Calvo; 2019), es por esta razón que es factible la recomendación de dosis entre 10-15 kg S ha⁻¹, con el objetivo de cubrir posibles deficiencias a este nutriente (Carciochi y col., 2015).

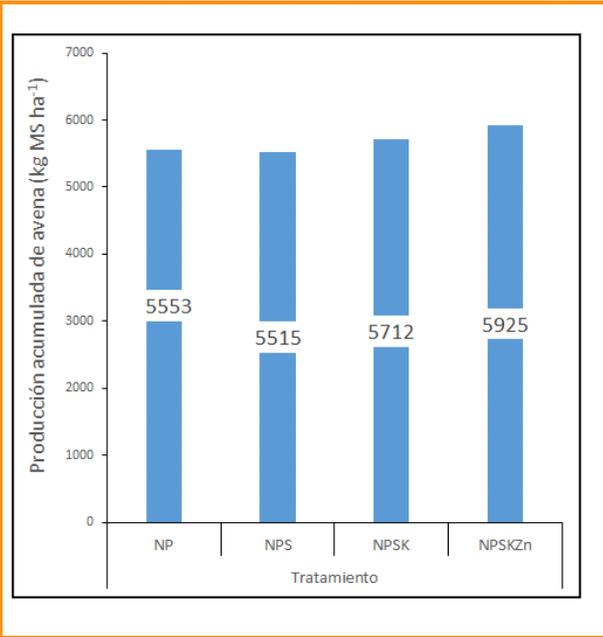


Figura 5: Producción de avena en función del agregado de nutrientes.

En las Figuras 6 y 7 se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de la base de datos existentes tanto para K como para Zn. Para ambos nutrientes, los valores de disponibilidad por debajo del umbral están representada por muy pocos sitios.

Para K, al incorporar los datos de las pasturas el umbral fue levemente menor al informado por Pautasso y col. (2022) y estuvo dentro del rango (145 – 204 ppm) definido por Orcellet y col. (2022).

En el análisis conjunto del set de datos de este trabajo y el usad para determinar el umbral de Zn disponible en trigo (Pautasso y col.; 2022), el umbral obtenido no se modificó. El umbral definido para trigo y avena en este trabajo (0,42 ppm) es inferior al informado para trigo en el resto de la Pampa Húmeda, que es de 1,03 ppm (martines Cuesta; 2021).

Los modelos obtenidos con la metodología arco seno logaritmo presentaron menores ajustes para definir los umbrales de K intercambiable (R^2 : 19%) y Zn disponible (R^2 : 22%).

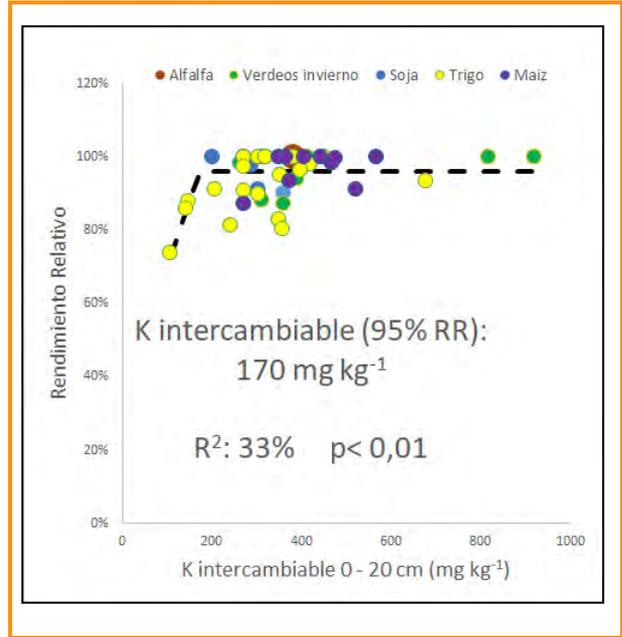


Figura 6: RR de los cultivos en función del K intercambiable.

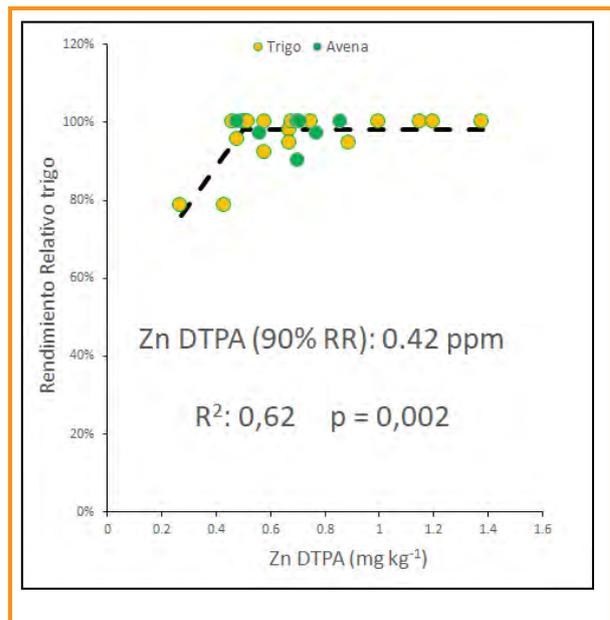


Figura 7: RR de trigo y avena en función del Zn disponible.

Conclusiones

El N y el P son los nutrientes que en mayor medida limitan la producción de materia seca de avena, obteniéndose incrementos significativos con su agregado, pero con efectos dependientes de los niveles de disponibilidad de dichos nutrientes en los suelos. Por lo tanto, un correcto

diagnóstico a partir de variables de suelos es necesario para maximizar la producción de materia seca de los verdes de invierno.

La producción de avena no se limita cuando la disponibilidad de N en el suelo (suelo más fertilizante) en los primeros 20 cm, está por encima de 80 kg N ha⁻¹.

El umbral definido de P Bray es mayor al informado y utilizado habitualmente en la región para el resto de los cultivos. En este trabajo se encontró un umbral similar al reportado para alfalfa.

Para el manejo de K y Zn, las variables de suelos de diagnóstico son las mismas que para otros cultivos; con valores de umbrales semejantes para K intercambiable e inferiores para Zn disponible.

La estrategia en el manejo de azufre sugerida, para evitar posibles deficiencias, es el agregado de dosis entre 10-15 kg S ha⁻¹ por año.

Bibliografía

- Bertolotto M. y M. Marzetti. 2017. Manejo de malezas problemáticas. Cultivos de cobertura. Bases para su manejo en sistemas de producción. Disponible en <https://www.aapresid.org.ar/wp-content/uploads/sites/3/2017/09/AAP-Original-Cultivos-de-cobertura.pdf> (Verificado marzo 2023).
- Carciochi, W.; G. Divito; N. Reussi Calvo; H. Echeverría. 2015. Las mejores prácticas de manejo de la fertilización azufrada en cultivos extensivos. IAH 20 - Diciembre 2015.
- Correndo, A.A., F. Salvagiotti, F.O. García and F.H. Gutiérrez-Boem. 2017. A modification of the arcsine-log calibration curve for analysing soil test value-relative yield relationships. *Crop Pasture Sci.* 68:297-304., doi:10.1071/CP16444
- Dietz, J. I.; M. Schierenbeck; N. Martínez & M.R. Simon. 2016. Aplicación de fungicidas y fertilización nitrogenada en avena: efectos sobre la generación de biomasa aérea y rendimiento. *Revista FAVE - Ciencias Agrarias* 15 (2) 2016. ISSN 1666 - 7719.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Mead, R., R.N. Curnow, y A.M. Hasted. 1993. *Statistical methods in agriculture and experimental biology.* Chapman and Hall, London, 415p.
- MAGyP. 2023. Agricultura - Estimaciones agrícolas. Disponible en <https://datos.gob.ar/dataset/agroindustria-agricultura---estimaciones-agricolas> (Verificado marzo 2023).
- Marino M. y A. Berardo. 2014. Pasturas y pastizales. Pp. 555 - 583. En: H. E. Echeverría y F. O. García (eds). *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos.* Editorial INTA, Bs. As. Argentina.
- Martínez Cuesta N; W. Carciochi; F. Salvagiotti; H. Sainz Rozas; N. Wyngaard; M. Lopez De Sabando & P. Barbieri. 2021. DTPA-extractable zinc threshold for wheat grain yield response to zinc fertilization in Mollisols. *SSSA J.* 2021; 85:1858 - 1862.
- Orcellet J.M.; C. Quintero; E. Figueroa; M.F. González Sanjuan y F.O. García. 2022. Potasio en cultivos extensivos del litoral argentino. En *Actas XXVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. "Suelos saludables, sustento de la sociedad y el ambiente"*. Buenos Aires, Argentina. 15 al 18 de noviembre de 2022.
- Pautasso, JM y JE Quinodoz. 2018. Fertilización de avena y raigrás. En *Actas XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo San Miguel de Tucumán*, 15 al 18 mayo 2018.
- Pautasso, JM; JE Quinodoz, L. Lezana, RM. Isaurralde, Y Peltzer, M Giordano, C Quintero, E Zufiaurre y J Ojeda. 2020. Respuesta a la fertilización nitrogenada de avena y raigrás. En *Actas XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. "Suelos: Desafíos para una producción y desarrollo sustentables"*. Corrientes, Prov. de Corrientes, Argentina. 26 al 29 de mayo de 2020.
- Pautasso, JM; PA Barbagelata y R. Melchiori. 2022. Respuesta al agregado de potasio y zinc en trigo, soja y maíz en Entre Ríos. En *Actas XXVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. "Suelos saludables, sustento de la sociedad y el ambiente"*. Buenos Aires, Argentina. 15 al 18 de noviembre de 2022.
- Prystupa, P. 2014. Cebada, avena y alpiste. Pp. 537-554. En: H. E. Echeverría y F. O. García (eds). *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos.* Editorial INTA, Bs. As. Argentina.
- Rubio G.; F. Micucci y F. García. 2012. Capítulo 14. Ciclado de nutrientes y fertilización de pasturas. Pp. 263-292. En *Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la Región Pampeana.* Editores: R. Álvarez; P. Prystupa; M. Rodríguez y C. Álvarez. Editorial FA - UBA. Bs. As. ISBN 878-987-27793-7-5.
- Wingard N. y N. Reussi Calvo. 2019. Avances en la interpretación de análisis de suelos. En *Simposio Fertilidad 2019. Conocer más, Crecer mejor.* 8 y 9 de mayo. Rosario. Santa Fe. Argentina.

Incrementos en la eficiencia en el uso del nitrógeno disminuyen las emisiones de óxido nitroso, pero pueden penalizar el rendimiento de la caña de azúcar

Jorge Chalco Vera y Martín Acreche

EEA Salta, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria-CONICET, Ruta Nacional 68 km 172, Cerrillos (4403), Salta, Argentina.

Resumen

La caña de azúcar es la principal fuente de producción de azúcar y uno de los cultivos más importantes en producción de bioetanol. Además, presenta un gran potencial bioenergético por la utilización de los residuos de cosecha. Sin embargo, al ser un cultivo de alto potencial de crecimiento, demanda considerables cantidades de N sintético (por lo general como urea) para su crecimiento (alrededor de 110 kgN ha^{-1}). Bajo las prácticas de manejo tradicionales de este cultivo, una parte importante de este N se pierde a la atmósfera en forma de óxido nitroso (N_2O), aportando de manera considerable al creciente efecto invernadero. Por ello, el diseño de estrategias de manejo de la fertilización con nitrógeno (N) tendientes a aumentar la eficiencia en el uso de nitrógeno (NUE) y disminuir las emisiones de N_2O son necesarias para la producción sustentable de este cultivo. El objetivo de este estudio fue evaluar, en un sistema de cultivo de caña de azúcar subtropical, si las variaciones en NUE (por tasas de N decrecientes o cambios en las formulaciones de fertilización nitrogenada) permiten disminuir las emisiones de N_2O y, en qué medida, se penaliza el rendimiento.

El estudio se condujo en Famaillá, Tucumán, principal área cañera de Argentina durante dos ciclos productivos consecutivos. Se utilizó un diseño en franjas completamente aleatorizadas con 3 repeticiones, y los tratamientos utilizados fueron: sin fertilizante, una dosis baja y una dosis alta de urea (55 y 110 kgN ha^{-1} , respectivamente), y una dosis alta de nitrato de amonio (110 kgN ha^{-1}). Se determinaron las propiedades físico-químicas del suelo al inicio de cada experimento, y el contenido de humedad gravimétrica y nitrógeno del suelo (NO_3^- y NH_4^+) en cada muestreo de gases. Las emisiones de N_2O se determinaron mediante la utilización de cámaras estáticas ventiladas y posterior

cuantificación mediante cromatografía gaseosa. Los intervalos de captura de gases fueron 0, 15 y 30 minutos. En madurez comercial del cultivo, se determinó el rendimiento (en cantidad y calidad) en fresco y seco del mismo. Posteriormente, se determinó el contenido de N de las muestras cosechadas mediante el método de Kjeldahl.

Existió una asociación negativa entre las emisiones de N_2O y la NUE. Con altas tasas de N (110 kgN ha^{-1}), el nitrato de amonio produjo un 37% más de emisiones acumuladas de N_2O y un 13% menos de NUE, penalizando su rendimiento en 12%, respecto a la urea (Tabla 1 y Figura 1). Estas mayores emisiones del nitrato de amonio se observaron a partir de las 48 h después de la fertilización, y se asociaron principalmente con el aporte directo de NO_3^- al suelo. Con bajas tasas de N (55 kgN ha^{-1}), la urea disminuyó un 30% las emisiones acumuladas de N_2O e incrementó en un 15% la EUN, pero penalizó el rendimiento en un 12%, respecto a la dosis alta de este fertilizante (Tabla 1 y Figura 1).

En base a los resultados encontrados se puede concluir que, para las condiciones ambientales de Tucumán, Argentina, NUE por encima de 160 kg (MS) de caña por kg de N disponible en el suelo penalizan el rendimiento del cultivo, mientras que NUE por debajo de 140 kg (MS) de caña por kg de N disponible en el suelo no permiten mitigar las emisiones de N_2O . Estos hallazgos aportan al diseño de nuevas estrategias de manejo de la fertilización con N en caña de azúcar basadas en evitar la adición directa de nitratos en altas dosis posiblemente mediante (i) inhibidores de la nitrificación, y (ii) la respuesta del cultivo a la urea con dosis menores a las tradicionales.

Tabla 1. Medias para rendimiento de caña, eficiencia en el uso del N (NUE), emisiones acumuladas de N₂O y emisiones de N₂O escaladas al rendimiento para los diferentes tratamientos de fertilización con N en caña de azúcar.

Tratamiento	Rendimiento de caña	NUE	Emisiones acumuladas de N ₂ O	Emisiones de N ₂ O escaladas al rendimiento
	(t MS ha ⁻¹)		(kg N ₂ O-N ha ⁻¹ año ⁻¹)	(g N ₂ O-N t caña ⁻¹)
Sin fertilizante	20,2 a	181,5 a	1,6 a	80,7 a
Urea baja (55 kgN ha ⁻¹)	24,5 b	148,7 b	1,9 a	88,5 a
Urea alta (110 kgN ha ⁻¹)	27,8 c	128,9 bc	2,7 b	100,3 a
Nitrato de amonio (110 kgN ha ⁻¹)	24,4 b	111,8 c	3,7 c	156,6 b

Letras diferentes muestran diferencias significativas entre tratamientos al 0.05.

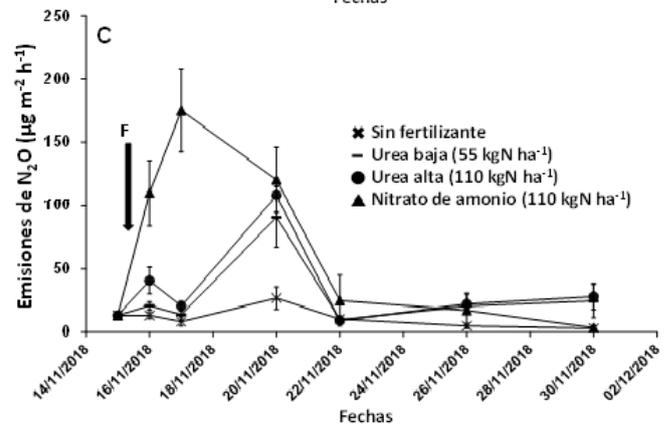
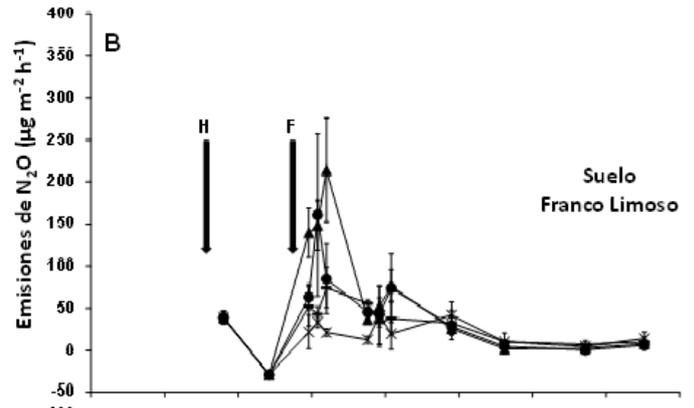
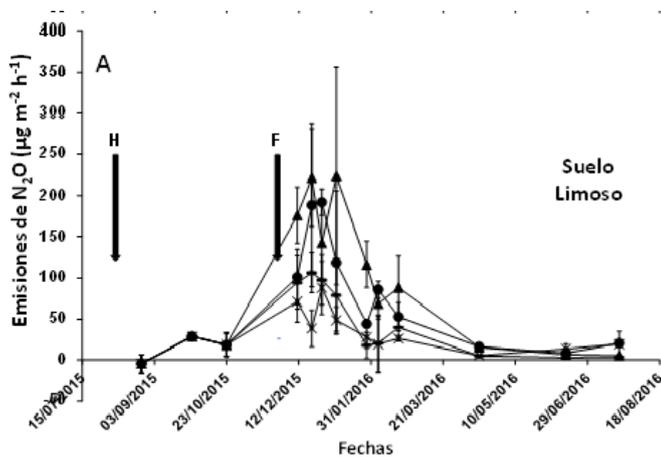


Figura 1. Emisiones de N₂O del sistema suelo-planta de caña de azúcar para diferentes tratamientos de fertilización con N. Los paneles A y B muestran las emisiones a lo largo del ciclo del cultivo, y el panel C las emisiones intensivas en un período de 15 días posteriores a la fertilización. Las flechas representan el momento de la fertilización (F) y cosecha del ciclo anterior (H). Las barras representan el error estándar.