



Simposio
Fertilidad
2015 | *Nutriendo los suelos
para las generaciones
del futuro*





Nutriendo los Suelos para las Generaciones del Futuro

El suelo sustenta la producción agrícola proveyendo el agua y los nutrientes esenciales para el crecimiento de los cultivos, entre otras muchas funciones. Cuidarlo es la misión de toda la sociedad y, sin lugar a dudas, una prioridad para el sector agrícola del país y del mundo. El Simposio Fertilidad 2015 “Nutriendo los Suelos para las Generaciones del Futuro”, organizado por el Instituto Internacional de Nutrición de Plantas (IPNI), Programa Latinoamérica Cono Sur, y la Asociación Civil FERTILIZAR, se asocia al Año Internacional de los Suelos 2015 instituido por la FAO.

Como en ocasiones anteriores, nos acompañan y se asocian a esta celebración del Año Internacional de los Suelos 2015, instituciones y organizaciones afines a las cuales les estamos profundamente agradecidos: el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACCS), la Región Sur de Santa Fe de los grupos CREA, la Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa (AAPRESID), la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Rosario (UNR), la Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes (IFA), y la Fundación Producir Conservando.

Nuestro objetivo es difundir y discutir el conocimiento disponible en fertilidad de suelos y nutrición de cultivos para contribuir a la formulación de las mejores prácticas de manejo de los nutrientes y fertilizantes. Los paneles de presentaciones incluyen las siguientes temáticas:

- Sustentabilidad de los sistemas agropecuarios
- Reciclado de nutrientes de fuentes no convencionales
- Manejo sustentable del recurso suelo
- Cómo estamos y cómo podemos mejorar la producción de granos
- Buscando una producción efectiva y eficiente: Desafíos y oportunidades para las próximas campañas
- La fertilización en el largo plazo: efectos productivos y económicos
- Panel: Un mano a mano con los que saben de fertilización de cultivos:

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

Las dos jornadas de trabajo nos permitirán intercambiar información y experiencias con distinguidos profesionales nacionales y extranjeros que nos presentarán su visión sobre el rol de la nutrición de cultivos en la búsqueda de una agricultura más eficiente y sustentable. IPNI Cono Sur y Fertilizar A.C. agradecen muy especialmente la participación de los disertantes de Honorable Cámara de Diputados de la Nación, INTA, las Universidades de Buenos Aires, Entre Ríos, Mar del Plata, Rosario, San Luis y Río Cuarto, CONICET, Universidad de Georgia (EE.UU.), Unicampo Uruguay, AAPRESID, IFA, Bolsa de Cereales de Buenos Aires, Laboratorio Fertilab, y Monsanto.

Rosario, 19 de Mayo de 2015

Dr. Fernando O. García
Director Regional, IPNI Cono Sur
fgarcia@ipni.net

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

Disertación	Autor	Página
El rol de los fertilizantes en la producción mundial: aportes a la sustentabilidad económica, social y ambiental	Lic. María Antip - Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes (IFA). Paris, Francia	5
Sustentabilidad del agua y los nutrientes en nuestros sistemas agrícolas: Apuntando a un blanco móvil	Dr. Esteban Jobbagy - Grupo de Estudios Ambientales, IMASL - CONICET y Universidad Nacional de San Luis.	11
Reciclando nutrientes: Ventajas, oportunidades, desafíos y amenazas	Dr. Miguel Cabrera – Universidad de Georgia, EE.UU.	15
Nuestro recurso suelo - 2015 Año Internacional de los Suelos		
La compactación de los suelos bajo agricultura	Dra. Carina Álvarez – Facultad de Agronomía (UBA).	22
La materia orgánica de los suelos agrícolas: Formación, evolución y manejo	Dr. Gervasio Piñeiro – Facultad de Agronomía (UBA).	28
Reflexiones acerca de la aplicación del Plan de Uso y Manejo de Suelos de Uruguay	Ing. Agr. Esteban Hoffman – Unicampo, Uruguay.	33
Fundamentos del proyecto de ley de promoción de uso de fertilizantes de Argentina	Dip. Ing. Agr. Luis Basterra - Honorable Cámara de Diputados de la Nación, e Ing. Agr. Jorge Bassi - Fertilizar Asociación Civil.	44
Cómo estamos y cómo podemos mejorar la producción de granos		
Producción de granos y adopción de tecnología en Argentina	Ing. Agr. Juan Martín Brihet – Bolsa de Cereales de Buenos Aires.	49
Brechas de rendimiento de trigo, soja y maíz en Argentina	Dr. Juan Pablo Monzón – CONICET, Unidad Integrada INTA-FCA Balcarce.	55
Manejo nutricional eficiente para maximizar la producción de los cultivos	Dr. Gabriel Esposito – Facultad de Agronomía y Veterinaria (UNRC).	59
Buscando una producción eficiente y efectiva en una agricultura sustentable		
Aportes de la ecofisiología en el manejo, nutrición y mejoramiento de cultivos	Dr. Lucas Borrás – Facultad de Ciencias Agrarias (UNR), CONICET.	63
Destino de los nutrientes en el ambiente	Dra. María Carolina Sasal – EEA INTA Paraná.	65
La fertilización en el largo plazo		
El valor de estudios de largo plazo para el manejo de la nutrición de soja	Dr. Martín Díaz Zorita – Fertilizar Asociación Civil.	72
La fertilización y una visión empresaria de largo plazo	Ing. Agr. Hugo Ghio – Productor rural, AAPRESID.	79
¿Qué nos dicen los números de la reposición de nutrientes en el largo plazo?	Ing. Agr. Adrián A. Correndo – IPNI Cono Sur.	84

Poster	Autor	Página
Revisión del marco legal sobre uso y conservación de suelos en la Argentina	Abruzky y Torres Duggan	96
Respuesta del maíz a la fertilización nitrogenada por zonas de manejo	Albarenque et al.	105
Sumando tecnología a los cultivos de cobertura: efectos de la fertilización nitrogenada sobre la producción de biomasa y eficiencia de uso de agua	Álvarez C. et al.	109
Pérdidas de fósforo total de suelos pampeanos inducidas por el uso agrícola	Alvarez R. et al.	113
Contribución de la fertilización con nitrógeno, fósforo y azufre a la productividad de maíz en la Pampa Arenosa	Barraco et al.	116
Fertilización nitrogenada y azufrada de cebada cervecera en el norte de la provincia de Buenos Aires	Boero et al.	120
¿Qué sabemos del diagnóstico de azufre en los cultivos de la región pampeana argentina?	Carciochi et al.	125
Momento de fertilización con N y S y requerimientos nutricionales en maíces flint y sedimentados	Ferraguti et al.	133
Efectos de diferentes estrategias de fertilización sobre los rendimientos, el balance de nutrientes y su disponibilidad en los suelos en el largo plazo	Ferraris et al.	137
Intensificación de secuencias basadas en soja y su efecto sobre el nitrógeno del suelo	Martínez et al.	143
Productividad y consumo de agua de maíz tardío en el centro de San Luis (Argentina): Cambios provocados por la fertilización nitrogenada	Mercau et al.	151
Análisis económico de rotaciones y fertilización en soja	Miguez y Daverede	155
Estrategias de fertilización con P por zonas de manejo en maíces tardíos	Naville et al.	159
Mineralización de nitrógeno en maíz: efecto de zona y fecha de siembra	Orcellet et al.	165
¿Podemos mejorar el diagnóstico de nitrógeno en maíz en la región pampeana?	Orcellet et al.	170
¿Cómo influye la agriculturización sobre la calidad edáfica en el Chaco Sub-húmedo?	Osinaga et al.	175
Rendimiento y ajuste de la fertilización con N en trigo según datos pluviométricos	Pautasso et al.	181
Delimitación de zonas de manejo: una herramienta para mejorar el manejo de nitrógeno en trigo	Peralta et al.	187
El cultivo de maíz fertilizado con nitrógeno incrementa el contenido de glomalina al suelo	Quinteros et al.	196
Análisis de ensayos en franjas para la fertilización variable de nitrógeno	Redel et al.	198
¿El análisis de suelo permite diagnosticar la deficiencia de cinc en el cultivo de maíz?	Barbieri et al.	203
La fertilización continua de largo plazo: Efectos sobre la estratificación del fósforo	Sucunza et al.	208
Impacto de la fertilización con K y Mn sobre la severidad de <i>Macrophomina phaseolina</i> en plantas de soja	Tobar et al.	212
Biomasa y aprovechamiento de agua y nitrógeno de raigrás en un Haplustol éntico tratado con residuos de feed lot y zeolitas	Torres Duggan y Rodríguez	217
Efecto de la fertilización de largo plazo sobre la exportación y relaciones N, P y S en granos de soja	Vega et al.	226
Efecto de la fertilización mineral sobre la actividad microbiana y propiedades químicas en suelos agrícolas de la provincia de Santa Fe - Argentina	Verdenelli et al.	231
Fertilización con fósforo y azufre en dos variedades de alfalfa sobre un suelo deficiente de San Cristobal, Santa Fe	Vivas et al.	237
Respuesta de la colza a la aplicación de N, S y B en el centro-sur bonaerense	Zamora et al.	246

Fertilizar los Cultivos para Mejorar la Salud Humana: Un Estudio Científico

Tom W. Bruulsema, Patrick Heffer, Ross M. Welch, Ismail Cakmak y Kevin Moran

T.W. Bruulsema es Director, Programa para Norte y Noreste de América, Instituto Internacional de Nutrición de las Plantas, Guelph, Ontario, Canadá; e-mail: Tom.Bruulsema@ipni.net

P. Heffer es Director, Servicio de Agricultura, Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes, París, Francia; e-mail: pheffer@fertilizer.org

R. M. Welch es Científico Principal, Centro Robert W. Holley para Agricultura y Salud de la Universidad de Cornell, Ithaca, Nueva York, EE.UU.; e-mail: rmw1@cornell.edu

I. Cakmak es Profesor, Facultad de Ingeniería y Ciencias Naturales, Universidad de Sabanci, Estambul, Turquía; e-mail: cakmak@sabanciuniv.edu

K. Moran es Director del Centro de Competencia de Micronutrientes y Foliare de Yara, Yara Pocklington (Reino Unido) Ltd., Manor Place, Pocklington, York, Reino Unido; e-mail: Kevin.Moran@yara.com

Gran parte de la humanidad depende para su sustento de que la producción de alimentos aumente mediante la aplicación de fertilizantes a los cultivos. Los fertilizantes contribuyen tanto a la cantidad como a la calidad de los alimentos producidos. Utilizados de la manera correcta - aplicando la fuente adecuada en la dosis, momento y lugar adecuado - y en los cultivos adecuados, contribuyen en gran medida a la salud y bienestar de la humanidad.

Desde 1948, la Organización Mundial de la Salud ha definido la salud humana como “un estado de bienestar físico, mental y social completo y no solamente la ausencia de afecciones o enfermedades”. Una reflexión sobre esta definición le lleva a uno a darse cuenta de que la responsabilidad sobre la salud humana se extiende mucho más allá del importante ámbito de la ciencia médica, para incluir muchas otras disciplinas. La concesión del Premio Nobel de la Paz de 1970 al Dr. Norman Borlaug indica un alto nivel de reconocimiento en la vinculación de las ciencias agrícolas con esta definición de la salud humana.

El creciente uso de los fertilizantes en los cultivos agrícolas ha aumentado la producción por unidad de superficie, incrementando la oferta total de alimentos y contribuyendo a su vez a la calidad de los alimentos y a su contenido de elementos traza esenciales. Un aumento de la producción de los cultivos que son más receptivos a los fertilizantes también ha cambiado el conjunto de los cultivos producidos y su adecuación a las necesidades nutricionales de los seres humanos.

No hay salud humana sin alimentos. La misión de la agricultura es mucho más que producir alimentos básicos; es suministrar alimentos que nutran la salud humana. El uso de fertilizantes

refuerza esa misión. Un desarrollo agrícola sostenible y un uso sostenible de los fertilizantes deben centrarse cada vez más en mejorar la salud humana, con el objetivo de lograr vidas sanas y productivas para todos, en el contexto de una población mundial en rápido crecimiento. Aunque el papel actual de los fertilizantes en apoyar a la salud humana es importante, las oportunidades para expandir dicho papel aún más lejos también son sustanciales.

El desarrollo sostenible requiere una visión que va más allá de las preocupaciones inmediatas e importantes sobre la productividad y la rentabilidad a nivel de explotación, abarcando también el diseño de sistemas agrícolas para proporcionar una mejor nutrición humana. Este estudio tiene como objetivo proporcionar un conocimiento preciso de los múltiples vínculos a las cualidades de los cultivos que influyen en la salud humana. La propuesta de la industria sobre el Manejo de Nutrientes 4R – los 4 Requisitos de aplicación de la fuente correcta en la dosis correcta, en el momento correcto y en el lugar correcto - necesitará incluir estos vínculos como parte de la definición de “correcto”.

Seguridad Alimentaria y Nutricional

Existe seguridad alimentaria cuando todas las personas tienen, en todo momento, acceso físico, social y económico a alimentos suficientes, seguros y nutritivos. La seguridad nutricional implica el acceso a la adecuada utilización y absorción de los nutrientes presentes en los alimentos, con el objetivo de ser capaz de vivir una vida sana y activa (FAO, 2009).

Entre 1961 y 2008, la población mundial creció desde 3100 hasta 6800 millones. En el mismo pe-

ríodo, la producción mundial de cereales aumentó de 900 a 2.500 millones de toneladas (**Figura 1**), con gran parte del crecimiento debido al incremento en el uso mundial de fertilizantes, desde 30 hasta más de 150 millones de toneladas. Sin la utilización de fertilizantes, la producción mundial de cereales se habría reducido a la mitad (Erisman et al., 2008).

Al duplicar las cantidades de Nitrógeno y Fósforo que se incorporan a la biosfera terrestre, el uso de fertilizantes ha jugado un papel decisivo en hacer posible el acceso de los seres humanos a los alimentos. Sin embargo, no todos tienen ese acceso. El hambre crónica afectó todavía en 2009 a una sexta parte de la población mundial. En 2050, según la FAO, la población humana requerirá un aumento del 70% en la producción agrícola mundial, en comparación a la que existía entre 2005 y 2007 (FAO, 2012). Los futuros incrementos de los rendimientos que se prevén a través de la mejora genética seguirán dependiendo todavía de la reposición de los nutrientes extraídos, mediante el uso de todas las fuentes posibles, orgánicas y minerales, de la forma más eficiente posible.

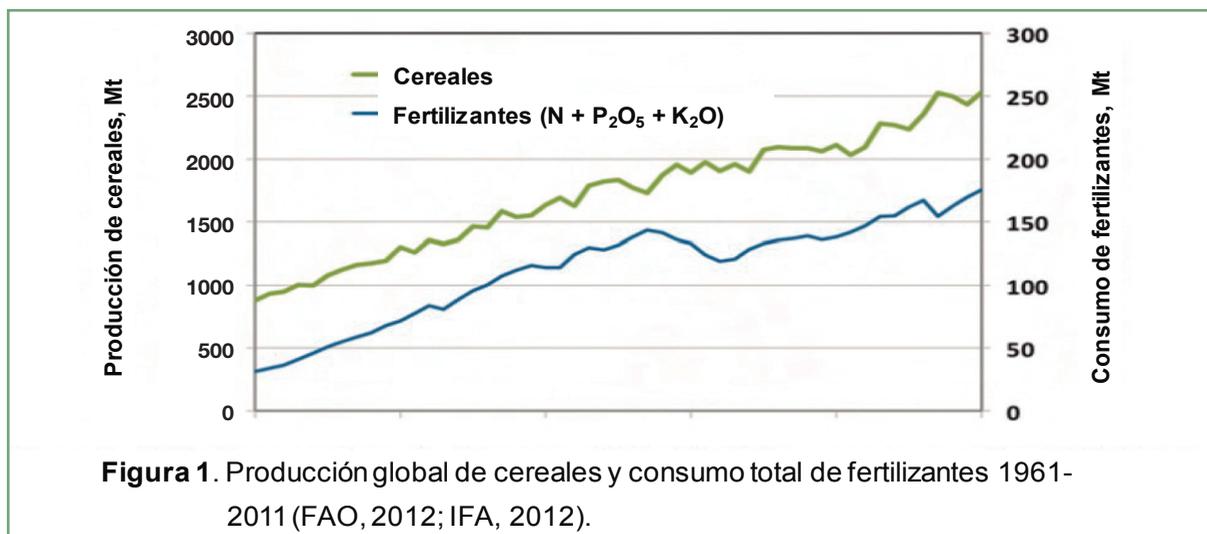
Seguridad Nutricional. Además de a los rendimientos, la nutrición de las plantas afecta a otros aspectos importantes de las necesidades nutricionales humanas, incluyendo las cantidades y tipos de hidratos de carbono, proteínas, grasas, vitaminas y minerales. Muchos de los componentes saludables de los alimentos se potencian mediante la aplicación de nutrientes minerales.

Dado que la mayoría de los agricultores ya fertilizan con el fin de obtener rendimientos óptimos, estos beneficios son fácilmente subestimados. Los elementos traza que son importantes para la nutrición humana se pueden optimizar en la dieta mediante su aporte a los cultivos alimenticios.

Existe la oportunidad de mejorar los rendimientos y la calidad nutricional de cultivos alimenticios tales como las legumbres, cuyos rendimientos y niveles de producción no han seguido el ritmo de crecimiento de la población. Asegurar que estos cultivos mantengan una competitividad económica con los cereales requiere de políticas que recompensen a los agricultores por producir aquellos componentes nutricionales que sean de mayor importancia para la salud humana.

La malnutrición de micronutrientes ha ido aumentando, en parte como consecuencia de una mayor producción de cereales básicos. Otros cultivos que son ricos en micronutrientes, sobre todo las legumbres, no se han beneficiado tanto de la Revolución Verde. Debido a que han llegado a ser relativamente más caros, actualmente representan una proporción más pequeña de la dieta de las personas desnutridas del mundo.

La biofortificación de los cultivos puede ser una estrategia efectiva para conseguir que grandes cantidades de personas con niveles deficientes de Hierro, vitamina A y Zinc, consigan unos niveles adecuados. La elección de los enfoques genéticos y/o agronómicos a la biofortificación depende de los micronutrientes. Los dos enfoques pueden ser también sinérgicos y complementarios.



En los cultivos básicos, los enfoques genéticos son más eficaces para el hierro y la vitamina A, mientras que los enfoques agronómicos, incluyendo los fertilizantes, pueden aumentar los niveles de Zinc, Iodo y Selenio en los alimentos. Mientras que las deficiencias de Iodo y Selenio no limitan el crecimiento de las plantas, la corrección de la deficiencia de Zinc puede beneficiar tanto a los cultivos como a los consumidores de los cultivos. La fertilización de los cereales con Zinc y Selenio mejora tanto la concentración como la biodisponibilidad de estos elementos traza. La elección del momento oportuno para la aplicación foliar de micronutrientes parece ser una práctica agronómica crítica para maximizar la acumulación de micronutrientes en el grano, tales como el Zinc. De acuerdo con los resultados obtenidos en experimentos de campo, la pulverización foliar tardía de Zinc en la fase de crecimiento da lugar a incrementos mucho mayores de concentración de Zinc en grano, en comparación con aplicaciones foliares más tempranas, en particular en la parte del endosperma, que es la parte del grano de trigo más comúnmente consumida. Una gran proporción de los suelos de todo el mundo son deficientes en Zinc (**Tabla 1**), y la proporción de personas con riesgo de desnutrición de Zinc, aunque varía regionalmente, es también sustancial (**Tabla 2**).

Alimentos funcionales

El **Calcio, Magnesio y Potasio** son macronutrientes minerales esenciales para los seres humanos. Las funciones esenciales de estos elementos minerales en los seres humanos son similares a las

que tienen en las plantas, con la notable excepción del principal papel del Calcio en los huesos y los dientes. Sus contenidos en las plantas están influenciados por sus aportes al suelo. Así, además de asegurar una producción agrícola óptima, las prácticas de fertilización pueden contribuir a satisfacer las necesidades de estos minerales en la nutrición humana. Las deficiencias de calcio se producen en países donde las dietas se basan en gran medida de los granos refinados o arroz (por ejemplo, Bangladesh y Nigeria). No es fácil definir una ingesta adecuada de Magnesio, pero los estudios indican que un número significativo de adultos, incluso en Estados Unidos, no consumen cantidades adecuadas. Del mismo modo, no se ha definido una cantidad diaria recomendada de ingesta de Potasio, pero tan sólo el 10% de los hombres y menos del 1% de las mujeres en Estados Unidos toman tanto o más de la ingesta adecuada, de 4.7 g/día.

Hidratos de carbono, proteínas y grasas. La aplicación de Nitrógeno a los cereales influye tanto en la producción de proteínas como en sus rendimientos. En el arroz, mientras que el Nitrógeno tiene sus mayores efectos en el rendimiento, puede además aumentar ligeramente el contenido y la calidad de las proteínas, ya que la glutelina que contiene posee concentraciones más altas del aminoácido limitante, lisina, que de las otras proteínas. En el maíz y el trigo, la proteína puede aumentar con dosis de Nitrógeno superiores a las necesarias para un rendimiento óptimo, pero la mejora en el valor nutricional puede estar limitada por las bajas concentraciones del aminoácido esencial lisina. Una excepción es el Maíz de Alta Calidad de Proteína, elaborado mediante mejora

Tabla 2. Proporción de suelos agrícolas deficientes en elementos minerales (basado en un relevamiento de 190 suelos del mundo; Sillanpaa, 1990).

Elemento	Porcentaje (%)
N	85
P	73
K	55
B	31
Cu	14
Mn	10
Mo	15
Zn	49

Tabla 3. Estimaciones globales y regionales de la proporción de la población con riesgo de ingesta inadecuada de Zinc (Hotz y Brown, 2004).

Región	Población con riesgo (%)
Norte de África y este del Mediterráneo	9
África Sub-sahariana	28
Latinoamérica y Caribe	25
EE.UU. y Canadá	10
Europa oriental	16
Europa occidental	11
Sudeste de Asia	33
Sur de Asia	27
China (+ Hong Kong)	14
Pacífico occidental	22
Global	21

genética varietal: su concentración de lisina es más elevada cuanto más Nitrógeno se aplique. En papas, el Nitrógeno aumenta la concentración de proteína y almidón, mientras que el Fósforo, Potasio y Azufre aumentan el valor biológico de la proteína. La composición de las grasas de los cultivos cambia poco con la fertilización, aunque la producción de grasas se incrementa en los casos en los que se mitigan las deficiencias de los nutrientes que limitan los rendimientos.

Las herramientas de manejo que identifican con una mayor precisión el producto óptimo, la dosis óptima, el momento óptimo y la ubicación óptima del aporte del Nitrógeno, ayudarán a mejorar la contribución de los fertilizantes a la producción de proteínas, grasas e hidratos de carbono saludables. Las mejoras genéticas encaminadas al uso eficiente del Nitrógeno pueden requerir una atención minuciosa en relación a su impacto en la cantidad y calidad de las proteínas en los cereales (Figura 2). Sin embargo, las prácticas de manejo de nutrientes tales como las aplicaciones foliares tardías o las tecnologías de liberación lenta pueden aumentar la disponibilidad del Nitrógeno para la producción de proteínas al tiempo que se reducen al mínimo las pérdidas de Nitrógeno excedente.

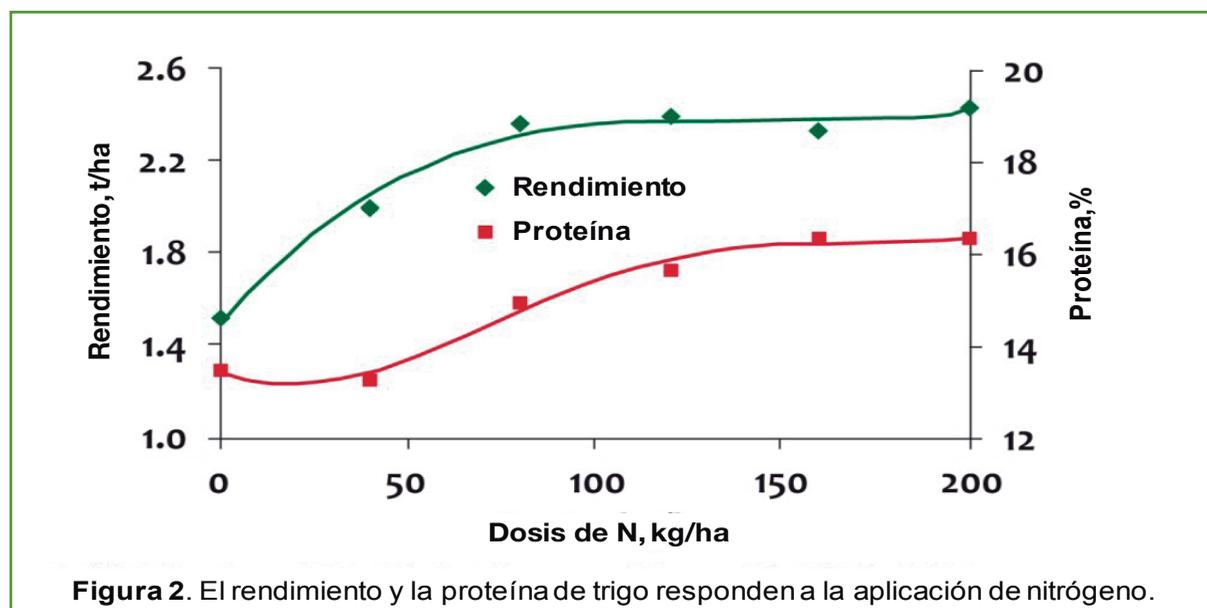
Salud y calidad funcional de frutas y verduras. La evidencia científica de numerosas fuentes ha demostrado que un manejo racional de los fertilizantes puede aumentar la productividad y el valor de mercado, así como las propiedades pro-

motoras de la salud de las frutas y verduras. Las concentraciones de carotenoides (precursores de vitamina A) tienden a aumentar con la fertilización nitrogenada, mientras que la concentración de vitamina C disminuye. Una fertilización potásica foliar con azufre mejora la dulzura, textura, color, contenidos de vitamina C, betacaroteno y ácido fólico de los melones. En el pomelo rosado, una fertilización potásica foliar suplementaria llevó a un aumento de concentraciones de betacaroteno y vitamina C. Varios estudios sobre el plátano han determinado correlaciones positivas entre la nutrición potásica y los parámetros de calidad de la fruta, tales como azúcares y ácido ascórbico, y correlaciones negativas con la acidez de la fruta.

Además de los efectos sobre las vitaminas, los fertilizantes pueden influir en los niveles de compuestos nutracéuticos (promotores de la salud) en los cultivos. La soja que crecía en suelos con deficiencia de Potasio en Ontario, Canadá, contaba con concentraciones de isoflavonas un 13% superiores cuando se fertilizaba con Potasio. También se ha demostrado que el Potasio promueve las concentraciones de licopeno en pomelos y tomates.

El brócoli y la soja son ejemplos de plantas que pueden aportar Calcio y Magnesio a la dieta humana. Cuando cultivos como éstos crecen en suelos ácidos, bajo una fertilidad limitada, la aplicación de cal puede aumentar los niveles de estos importantes minerales.

La concentración de los potentes pigmentos antioxidantes luteína y betacaroteno aumentan



generalmente en respuesta a la fertilización nitrogenada. Además de las vitaminas A, C y E, la fertilización nitrogenada puede ayudar a reducir el riesgo de desarrollar degeneración macular relacionada con la edad, que es una de las principales causas de ceguera.

Reducción de Riesgos

Enfermedad de la planta. En los cereales deficientes en Cobre, el ergot (*Claviceps* sp.) es un ejemplo de un riesgo para la seguridad alimentaria causada por una enfermedad de las plantas que puede ser controlada por la aplicación de fertilizantes con cobre. Al inmovilizar y competir por los nutrientes minerales, los patógenos vegetales reducen el contenido mineral, la calidad nutricional y la seguridad de los productos alimenticios de origen vegetal. Mientras que en el caso de algunas enfermedades específicas se han realizado controles nutricionales de las plantas, en el caso de la nutrición óptima para controlar las enfermedades de las plantas más relevantes para la seguridad alimentaria hay todavía falta de conocimientos.

Gestionando la nutrición se influye en las enfermedades y en su control. Las estrategias para reducir las enfermedades de las plantas a través de la nutrición vegetal incluyen:

- El desarrollo de las variedades que son más eficaces en la absorción del manganeso.
- La nutrición equilibrada con niveles óptimos de cada nutriente
- La atención a formas y fuentes adecuadas para el cultivo (por ejemplo, nitrato frente a amonio, cloruro frente a sulfato).
- La elección del momento óptimo, aplicando Nitrógeno en condiciones que favorecen la absorción de la planta y la respuesta al crecimiento.
- La integración con la labranza, rotación de cultivos y microbios del suelo.

Los sistemas agrícolas. Los agricultores ecológicos utilizan estrategias para la nutrición de las plantas que difieren de las de otros productores. ¿Estas diferencias influyen en la salubridad de los alimentos que producen? Debido a las fuentes limitadas de suministro de nutrientes, la agricultura ecológica no puede proporcionar alimentos suficientes para la población actual y creciente del mundo. Además, dado que los sistemas de producción ecológica se basan en gran medida en animales rumiantes y cultivos forrajeros para el ciclo de los nutrientes, las proporciones de tipos

de alimentos producidos no coinciden con los requisitos de una dieta sana. Una composición dietética desequilibrada puede causar problemas de salud como resultado de un suministro insuficiente de nutrientes esenciales o por un suministro excesivo de otros componentes alimenticios.

La composición de los alimentos producidos muestra pequeños cambios que se explican por las respuestas fisiológicas de las plantas a las diferencias en el suministro de Nitrógeno. A través de la agricultura ecológica, se incrementa la vitamina C, pero las vitaminas A y B, proteínas y nitratos se reducen. Mayores niveles de nitratos en los alimentos convencionales no amenazan y pueden ser beneficiosos para la salud humana. A pesar del gran interés por la calidad de los alimentos entre los partidarios de la agricultura ecológica, lo más importante para la salud humana es centrarse en el suministro de alimentos y en la composición de la dieta.

Evitando los radionucleidos. Cuando los suelos se contaminan con radionucleidos, como por ejemplo después de los accidentes con los reactores nucleares de Chernóbil o Fukushima, limitar la absorción de la planta se convierte en un objetivo importante para proteger la salud humana. Diversos estudios en suelos de la región de Gomel, Bielorrusia, mostraron que los niveles de cesio radiactivo (^{137}Cs) y estroncio radiactivo (^{90}Sr) en los cultivos disminuyeron en respuesta al incremento del Potasio intercambiable del suelo, con Potasio aplicado bien como fertilizante o como estiércol. Estos niveles de radionucleidos también disminuyeron con la adición de caliza dolomítica y de fertilizantes con Nitrógeno y Fósforo. La implicación de la población rural en los procesos de auto-rehabilitación y auto-desarrollo es una manera de mejorar la calidad de vida de la gente en territorios contaminados por radioactividad.

Resumen

Todo lo anterior demuestra el papel tan importante que los fertilizantes desempeñan en mejorar las propiedades de los cultivos relevantes para la salud de la humanidad.

Dado el importante papel de los fertilizantes en promover la seguridad alimentaria y nutricional, es cada vez más importante invertir en investigación que vaya dirigida a optimizar los beneficios asociados a su uso. La investigación necesita apoyar la adopción del Manejo de Nutrientes

4R para asegurarse que la fuente adecuada se aplica en la dosis adecuada, en el momento adecuado y en el lugar adecuado. Este concepto - apoyado por la industria de los fertilizantes - define “adecuado” como el más apropiado para conseguir los aspectos económicos, sociales y medioambientales de la sostenibilidad, siendo los tres esenciales para mantener la salud humana. Unido a cambios estratégicos apropiados en los sistemas agrícolas, hacia una producción con un mayor equilibrio de los alimentos para hacer frente a las verdaderas necesidades nutricionales de la humanidad, un énfasis en la investigación agronómica y en la ampliación del Manejo de Nutrientes 4R, aumentará los beneficios y minimizará los impactos negativos potenciales asociados con el uso de los fertilizantes.

Referencias

Erisman, J.W., M.A. Sutton, J. Galloway, Z. Klimont, y W. Winiwarter. 2008. Cómo un siglo de síntesis de amoníaco cambió el mundo. *Nature Geoscience* 1:636-639. FAO. 2012. <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx> and <http://www.fao.org/worldfoodsituation/wfs-home/csdb/en/>. Verificado Abril 2012.

FAO. 2009. El estado de la inseguridad alimentaria en el mundo 2009. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <http://www.fao.org/docrep/012/i0876e/i0876e00.HTM>

Hotz, C. y K.H. Brown. 2004. Grupo Consultivo Internacional de la Nutrición del Zinc (IZiNCG), documento técnico no. 1: Evaluación del riesgo de deficiencia de zinc en las poblaciones y las opciones para su control. *Food Nutr Bull* 25(1): S94-204.

IFA. 2012. Estadísticas de la Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes. [Online]. Disponible en <http://www.fertilizer.org/ifa/Home-Page/STATISTICS> (verified 27 April 2010).

Sillanpaa, M. 1990. Evaluación de micronutrientes a nivel de países: Un estudio global. *Boletín de Suelos de la FAO* 63. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma. ■

[volver al índice](#)

Sustentabilidad del agua y los nutrientes en nuestros sistemas agrícolas: Apuntando a un blanco móvil

Esteban Jobbágy

Grupo de Estudios Ambientales, Universidad Nacional de San Luis y CONICET
jobbagy@gmail.com

Agricultura: una fuerza transformadora de la tierra

Ninguna actividad humana involucra una intervención tan íntima sobre los procesos de la naturaleza como la producción agrícola. Estas intervenciones abarcan acciones explícitas que van desde los genes a los paisajes. Por la agricultura transformamos organismos para nuestro beneficio, los hemos llevado de un continente a otro, despejamos territorio para que estos organismos prosperen, a esos territorios les hemos impuesto ritmos estacionales y patrones de paisaje totalmente nuevos, les inyectamos fertilizantes y pesticidas y a veces los regamos, para poder retirar en forma sostenida grandes cantidades de biomasa. A partir de una compleja red de conocimientos, tecnologías y organizaciones y de un importante aporte de energía fósil; hoy desviamos un 25% de la biomasa que anualmente se genera en los continentes hacia productos que valoramos y consumimos, esto es el doble que hace 100 años. La mitad de esta cosecha proviene de las tierras cultivadas, que representan hoy un 20% de la superficie continental global (excluyendo hielos y desiertos). La fuerza transformadora de la agricultura ha cambiado simultáneamente la forma en que circulan el agua y los nutrientes y reorganizado la diversidad biológica del planeta, llegando a acorralar a muchas especies que hoy se vuelven muy raras o se extinguen y favoreciendo la expansión de otras que se vuelven invasoras.

Mientras el viaje agrícola que emprendimos como humanos hace 10000 años continúa, el interés y la preocupación por los “efectos colaterales” de la actividad sobre el ambiente crece y se transforma en un fenómeno cultural global de este siglo, capaz de generar cuestionamientos cada vez más profundos y globalizados. Lo ambiental ya no tiene sólo como foco la perpetuidad productiva de los lotes y de la actividad agrícola,

como fue en los tiempos del “dust bowl” norteamericano en los años 30. Hoy las consecuencias del accionar agrícola son visibles y preocupan más allá de lo productivo y más allá del límite de los establecimientos. La expansión de la agricultura en Argentina no escapa a estas tendencias pero propone desafíos propios, que en el caso del agua y los nutrientes se diferencian de los más típicos planteados en el resto del mundo. En esta presentación se busca destacar estas singularidades de la producción agrícola y el ambiente en Argentina que surgen de la convergencia única de condiciones ecológicas, económicas y políticas del país e imponen la necesidad de desarrollar un análisis independiente del problema.

El agua

A nivel global la preocupación principal respecto al agua es la de asegurar su provisión en cantidad, calidad y ritmo adecuado con el fin de abastecer las necesidades humanas y, cada vez más, también las de la vida silvestre. El sector agrícola está sujeto a escrutinio principalmente por ser el consumidor número uno de agua, a través del riego. Desde lo global, entonces, se ha popularizado una medida para evaluar a la agricultura que es la de la “huella hídrica”: Cuánta agua de lluvia o de riego hemos utilizado para obtener una unidad de producto. Pero el agua no tiene el mismo valor en todas partes ¿Vale lo mismo el agua que permitió producir un litro de leche usando alfalfa regada en Mendoza o maíz picado y pasturas de secano en la Cuenca del Salado? La importación ciega de indicadores envasados como la huella hídrica no nos ayuda a revisar el impacto ambiental de nuestra agricultura.

Argentina se distingue desde el punto de vista del agua y la agricultura por dos aspectos principales: (i) a pesar de tener tierras agrícolas y acuíferos bajo condiciones semiáridas a subhúmedas, es aún uno de los países menos regados

del planeta y (ii) la mayor parte de estas tierras se ubican en una llanura, la chaco-pampeana, de relieve extremadamente plano y por lo tanto propensa a desplegar inundaciones por ascenso freático. Estos dos aspectos llevan a que en la mayoría de los contextos agrícolas de nuestro país, la regulación hidrológica y no la provisión de agua, sean los aspectos hidrológicos que más nos preocupan. En una enorme parte de nuestras llanuras el uso conservador del agua que hace la agricultura nos causa problemas.

En la región pampeana, los niveles freáticos más elevados, la menor capacidad de albergar excesos de lluvia y, por lo tanto, los anegamientos e inundaciones más frecuentes son el problema principal. La creciente dominancia de cultivos anuales sobre pasturas o pastizales y el muy efectivo control de malezas y la acumulación de rastrojos en superficie han llevado a los lotes pampeanos a consumir una menor cantidad de agua por transpiración y hacerlo hasta profundidades menores del suelo, favoreciendo el acercamiento de las napas a la superficie. Mientras que en períodos secos esta nueva condición representa una oportunidad que cada vez es aprovechada en forma más consciente, la llegada de períodos húmedos encuentra un sistema mucho más vulnerable a los anegamientos e inundaciones. Esta mayor vulnerabilidad surge de la menor capacidad de albergar excesos hídricos, resultado de napas que se mantienen más superficiales, y de la reducción del consumo de agua cuando más necesario es incrementarlo, producto de la interrupción de las siembras y de la merma en la capacidad de consumo de agua de los sistemas de cultivo anual que se aplican.

En la región chaqueña, la escasez de agua es la preocupación más obvia en la agricultura, sin embargo un proceso lento de ascenso de napas y sales, que ha sido devastador en situaciones semiáridas de Australia, muestra algunos síntomas en esta región del país. Bajo monte, los suelos del Gran Chaco han mantenido un balance de agua sin excedentes líquidos, en el que toda la precipitación es evapotranspirada. Por esa razón estos suelos han acumulado grandes cantidades de sales debajo del tercer metro. La agricultura en la región dispara el comienzo de la recarga profunda de agua y transporta las sales hacia las napas, que suelen ser profundas. Sin embargo después de períodos largos bajo cultivos, se en-

cuentran napas salobres cercanas a la superficie y comienzan a surgir los primeros problemas de lo que suele llamarse “salinización de secano”. Solo con sistemas de cultivo capaces de hacer un uso prácticamente exhaustivo del agua de lluvia, puede mantenerse controlado este proceso. Nuestra agricultura parece hacer esto mucho mejor que la agricultura australiana, pero es necesario prestar atención al proceso y monitorear los ascensos de sales en forma continua, reconociendo la posibilidad de que se requiera mantener bajo cubierta forestal un parte significativa del área.

No necesitamos ahorrar agua de lluvia en estas llanuras, necesitamos usar las lluvias tan exhaustivamente como la hacían las pasturas o los bosques que reemplazamos con cultivos anuales. También necesitamos reconocer como las tensiones entre producción y ambiente relacionadas al agua implican asimetrías entre quienes causan y sufren los problemas. En región pampeana, por ejemplo, los tambos son el sistema productivo que generan menores excesos hídricos, pero uno de los que más los padece. Lleva tiempo y esfuerzo entender estos problemas hidrológicos que no conocen fronteras entre disciplinas. Hay que identificar a los actores involucrados y comprender sus demandas e intereses, hay que entender las causas subyacentes a los problemas ambientales que se plantean, atribuir responsabilidades a distintas prácticas productivas y sectores. Y por supuesto, es más fácil recurrir a un manual de la huella hídrica y confiar en que esa huella es sinónimo de sustentabilidad para algún círculo especializado de referencia. Pero sólo lo primero nos hará progresar y establecer mejores acuerdos.

Los nutrientes

A nivel global la agricultura tiene una de sus más grandes “cuentas pendientes” con el ambiente en los excesos de fertilización y los problemas de contaminación asociados. Las grandes “zonas muertas” del océano son tal vez el ejemplo más significativo de la magnitud de estos efectos. En las cuencas agrícolas más fertilizadas del planeta, los nutrientes que escapan de los lotes sobre-fertilizados viajan por los ríos hacia el océano y eliminan la vida a cientos de kilómetros mar adentro por eutrofización. El problema avanza en el Golfo de México, en el Mar Báltico y se suma recientemente el Mar de la China. Pero el

Mar Negro se recupera tras la interrupción de la fertilización que acompañó al colapso de la Unión Soviética. Como en el caso del agua, Argentina, por ahora, escapa al desafío más típico a nivel global y presenta otros desafíos propios dados por la austeridad de nuestra fertilización y la alta exportación de granos.

Mientras que la mayoría de las áreas agrícolas del mundo que expanden el área cultivada e incrementan la productividad se recuestan sobre un crecimiento sostenido de la fertilización, Argentina aún sostiene balances negativos (exportación > fertilización) en casi todo el territorio agrícola. Además de reflejarse en los cálculos que puedan hacerse desde un escritorio, estos desbalances vienen dejando una huella en el stock de nitrógeno y fósforo de los suelos y se reflejan en los niveles predominantemente bajos de concentración de nitratos de las aguas freáticas pampeanas. Hasta el presente nuestra agricultura ha crecido consumiendo el capital de nutrientes del suelo, lo que en el caso del nitrógeno ha sido posible gracias a la dominancia del cultivo de soja, que por otra parte impone una alta extracción de fósforo. Para sostener la productividad de los lotes agrícolas en el largo plazo es importante reconocer en qué medida los stocks de nutrientes hipotecados generan otros costos en el sistema y con qué facilidad podrán renovarse en el futuro. También es crítico comprender como el comportamiento de fertilización de los agricultores responde a señales del mercado de insumos y productos y a políticas públicas.

Paradójicamente, la austeridad en el uso de fertilizantes puede traer algunos problemas ambientales. Desde el punto de vista hídrico, al limitar el crecimiento y la actividad de la vegetación cultivada, la falta de nitrógeno llega en algunos casos de la región pampeana y chaqueña a limitar la transpiración y por lo tanto agrava el problema de la generación de excesos hídricos discutida en la sección anterior. Se suma a esto el problema de limitar la siembra de cultivos no fijadores de nitrógeno, particularmente maíz y cereales de invierno, lo cual no solo agrava el problema del balance hídrico sino que restringe también la capacidad del sistema de incorporar materia orgánica al suelo y cubrirlo de rastrojos. Esto es especialmente importante en la región chaqueña, donde en la medida en que las tierras deforestadas entregan su stock original de nutrientes del

suelo a los cultivos, la fertilidad química se agota y la posibilidad de fertilización se ve limitada por los mayores costos y riesgos climáticos de la agricultura en esa región.

A nivel global se reconoce hoy una crisis en el suministro de fertilizantes fosforados. El recurso mineral es limitado en magnitud y acotado en su distribución geográfica y su demanda crece. Una extracción acelerada por la dominancia de soja y una fertilización que no alcanza a acompañarla, sugieren que Argentina se encontrará en unas décadas con la necesidad de incorporar fósforo masivamente a sus suelos, y seguramente tendrá que hacerlo a precios mayores al actual. Hay mucho por hacer en varios frentes tecnológicos respecto a la crisis del fósforo y esto contempla no solo la oferta de fertilizante sino la reducción de su demanda por los cultivos. Una oportunidad poco contemplada surge de reconocer la naturaleza de la función del fósforo en las semillas y la posibilidad de reducir su consumo por la planta. La mayor parte del fósforo en los granos se acumula como ácido fítico que ofrece una fuente de este elemento a la plántula que se establece. Esta molécula no es digerida por los humanos y tampoco por cerdos y pollos, que son los primeros destinatarios del grano que cosechamos en nuestras llanuras. El ácido fítico abandona el tracto digestivo de los animales monogástricos sin ser aprovechado y constituye una de las principales fuentes de contaminación con fósforo de las aguas. Lograr cultivos que contengan mucho menos ácido fítico en sus granos puede aliviar la demanda global de fósforo y reducir el problema local de contaminación de las producciones animales intensivas. La baja concentración de fósforo de aquella pequeñísima fracción de los granos que se usan como semilla puede compensarse con peleteados u otras formas de suministro directo en la siembra. A diferencia de la extracción de nitrógeno de los cultivos que responde en forma directa a la producción de proteínas y es por lo tanto difícil de reducir, la de fósforo está destinada en gran medida a un componente de poca importancia nutricional, y esto constituye una oportunidad muy grande para el caso de la soja en Argentina que son respectivamente el grano con mayor demanda de fósforo y el país con mayor exportación neta de este elemento a otras regiones.

Aprender al hacer

Necesitamos una aproximación dinámica del problema producción-ambiente y sus soluciones, concentrada en cómo dirigir el cambio más que en cómo evitarlo. La visión estática de la naturaleza y la sociedad ha llevado a la propuesta del principio precautorio (comprendo, luego actúo) en los planteos del sector ambiental al productivo. Se reclama conocer las consecuencias de nuevas intervenciones agrícolas antes de implementarlas. Una respuesta común del sector productivo dentro de este marco estático ha sido la formulación de buenas prácticas de producción orientadas a una supuesta sustentabilidad. Pero es difícil definir cómo deberían ser esas prácticas a priori. Cambia el ambiente y lo que sabemos de él, cambian las tecnologías y las opciones, y la mejor práctica hoy puede ser mala mañana. Si adoptamos una visión dinámica de la naturaleza y la sociedad y reconocemos la insustentabilidad de las actividades humanas, surge como opción superadora la propuesta del manejo adaptativo (comprendo mientras actúo), que reclama implementar las nuevas intervenciones agrícolas, en forma gradual y experimental, acompañándolas con mecanismos explícitos de monitoreo, análisis, comunicación y debate de sus impactos ambientales. En esta visión se vuelven mucho más útiles que las buenas prácticas de producción, las buenas prácticas de aprendizaje y negociación. El manejo adaptativo involucra múltiples escalas. Los efectos del desmonte sobre la materia orgánica del suelo y el stock de carbono, sobre las napas freáticas, o sobre las poblaciones de grandes mamíferos nativos, requieren observaciones y observadores distintos y deben, en todos los casos y etapas, sumar aportes del sistema de ciencia y tecnología.

El agua ofrece buenos ejemplos. Era improbable anticipar todas las consecuencias hidrológicas que el reemplazo de pasturas y montes por agricultura tendría en nuestras llanuras. El gran experimento de hacerlo fue dando pistas y hoy, con el diario del lunes, las entendemos. Hemos generado excesos hídricos sostenidos y lo que en un principio se atribuyó exclusivamente a las fluctuaciones climáticas, hoy aparece también vinculado a los cambios en el uso del territorio. Ascensos freáticos de diez metros en Marcos Juárez desde los 70s con lotes que se inundan por primera vez en la historia. Napas que salvan

la producción en años secos pero que ponen en jaque siembras y cosechas en años más húmedos. Sales que aparecen en la superficie cuando menos lo esperamos. Hay que aprender sobre la marcha pero hay un método para eso. Nuclear expertos y observadores locales, plantear problemas actuales e hipotéticos, avanzar gradualmente con el cambio reservando zonas control. Medir las variables consideradas más sensibles. Hacer transparente la información y su interpretación. Debatir y negociar.

Y en este proceso hay que reclamar al sector de ciencia y tecnología que no sólo acompañe las etapas anteriores ni que se limite a evaluar las opciones productivas existentes sino que apoye la generación de otras opciones productivas superadoras, con la producción y al ambiente en la mira. De esta colaboración surge la mejor innovación. Hoy pasamos de medir niveles freáticos en un puñado de puntos de la región pampeana a tener plataformas online con datos de más de una centena de sitios sostenidos por productores. Articulamos esa información con datos de nuevos satélites capaces de medir el campo gravitatorio de la tierra ofreciéndonos en tiempo real una medida del agua acumulada en una región. Un “David” de freatómetros que se multiplican e integran en redes, un “Goliath” de tecnología espacial cada vez más sofisticada. Necesitamos a los dos en el equipo para entender y pronosticar anegamientos o aportes de la napa a los cultivos, mejorando sus planteos. Algunas organizaciones ambientalistas preocupadas por la pérdida de nuestros últimos pastizales establecen alianzas con el sector ganadero, convocan a la ciencia, y avanzan en el conocimiento sobre el efecto de distintas prácticas ganaderas sobre la preservación de hábitats, de flora y de fauna nativas. En cada ciclo de intervención, monitoreo, análisis y negociación/innovación, iremos generando sistemas mejores para producir y para cuidar el ambiente. Esa es la apuesta y se apoya en la colaboración y la transparencia. ■

[volver al índice](#)

Reciclando Nutrientes: Ventajas, Oportunidades, Desafíos y Amenazas

Miguel L. Cabrera

Departamento de Ciencias de Cultivos y del Suelo, Universidad de Georgia
Athens, Georgia, EE.UU.

Contacto: mcabrera@uga.edu

Este artículo trata sobre el reciclaje de nutrientes a partir de abonos generados en sistemas intensivos con animales confinados en corrales, ya sea en la producción lechera y en la cría de pollos de engorde (pollos parrilleros). Estas operaciones son cada vez más comunes a medida que la demanda de carne de pollo y de productos lácteos aumenta en todo el mundo. El subproducto común generado en la producción de pollos de engorde es un material seco llamado cama de pollo que consiste en una mezcla de material fibroso como aserrín o paja, excrementos de pollos, plumas y restos de alimento. En contraste, el subproducto común generado en los tambos con animales confinados es el “slurry”, el cual es una mezcla de excretas de vaca y de agua utilizada para la limpieza de las salas de ordeño y graneros. El reciclaje de nutrientes a través de estos abonos ofrece ventajas y oportunidades frente a la eliminación directa, pero también presenta desafíos y amenazas graves. En este artículo se proporciona información detallada sobre cada uno de estos temas.

Ventajas y Oportunidades

Como se muestra en las Tablas 1 y 2, la cama de pollo y los efluentes de tambo contienen can-

tidades importantes de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) que pueden ser utilizados para fertilizar los pastizales y cultivos.

La ventaja de utilizar estos subproductos como fertilizantes es que ofrece la oportunidad de reciclar los nutrientes, que de otra manera pueden conducir a una significativa contaminación ambiental, si se desechan en áreas donde se entierran o si se dejan acumular en pilas o lagunas en los campos. Otra ventaja es que permite el reciclaje de nutrientes como P y K que se extraen de depósitos geológicos, los cuales tienen una duración de vida finita. Por ejemplo, las reservas de roca fosfórica del mundo que representan la cantidad de P que se puede extraer a los precios actuales, son estimadas en 2400 millones de Mg de P (Villalba et al., 2008). Con una extracción actual de roca fosfórica de aproximadamente 20 millones de Mg de P por año, las reservas durarían aproximadamente 123 años. Hay reservas adicionales (llamadas reservas base) estimadas en 6500 millones de Mg de P, pero en estos depósitos sería más difícil extraer el P, lo que significaría precios más altos para el fertilizante fosfatado. No obstante, asumiendo que la totalidad de las reservas bases puedan ser minadas y que la extracción anual de roca fosfatada se mantenga

Tabla 1. Media y desvío estándar de las concentraciones totales de elementos seleccionados en 3662 muestras de cama de pollo, analizadas por el Laboratorio de Servicios Agrícolas y Ambientales de la Universidad de Georgia, Athens, Georgia, EE.UU.

	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Zn	Na
	%						mg kg ⁻¹		
Media	3.13	1.30	2.25	2.03	0.45	0.49	425	315	6372
Desvío estándar	0.66	0.38	0.56	0.86	0.11	0.18	238	221	1976

Tabla 2. Media y desvío estándar de la materia seca y las concentraciones de elementos seleccionados en 107 muestras de efluentes (Adaptado de Van Kessel y Reeves, 2002).

	Materia Seca	N Total	P Total	K Total	N Orgánico	NH ⁴⁺ -N
	g kg ⁻¹	kg m ⁻³				
Media	116	4.5	0.9	2.9	2.7	1.8
Desvío estándar	56	1.6	0.5	1.1	1.1	0.8

en 20 millones de Mg de P, las reservas base podrían agotarse en 335 años. Otras estimaciones, que consideran el aumento en la demanda de P debido al crecimiento de la población mundial, muestran que la vida de las reservas será de entre 70 y 100 años, y la de las reservas base entre 170 y 264 años (Smit et al., 2009). Para K, Roberts y Stewart (2001) reportan una vida útil de 325 años para las reservas y de 658 años para las reservas base. Estas estimaciones de la vida útil para los depósitos de P y K indican claramente que el reciclaje de estos nutrientes será crucial para mantener la productividad agrícola en las generaciones futuras.

Desafíos

Uno de los principales desafíos para el uso de la cama de pollo o los efluentes de tambo como fertilizantes es determinar la dosis correcta de aplicación teniendo en cuenta los requerimientos de nutrientes para un cultivo o forraje dado. El requerimiento N: P de la mayoría de los cultivos y forrajes varía entre 6 y 10, mientras que la relación N: P de estos abonos es de aproximadamente 2.5 para la cama de pollo y de alrededor de 5 para los efluentes de tambo (**Tablas 1 y 2**). En consecuencia, dado que la cama de pollo y los efluentes de tambo son aplicados comúnmente para abastecer las necesidades de N de un cultivo / forraje, se debe garantizar la aplicación de una dosis adecuada de P para que este nutriente no se aplique en exceso.

Cuando se estima la dosis de aplicación para cubrir los requisitos de N, es necesario tener en cuenta que el N en estos subproductos está presente en forma inorgánica y orgánica. El N inorgánico en la cama de pollo varía entre el 3% y el 55% del N total (Cabrera y Gordillo, 1995), con un valor promedio de alrededor del 10%. En contraste, el N inorgánico en los efluentes de tambo oscila entre el 26% y el 79% del N total (Cabrera y Gordillo, 1995), con un valor promedio de aproximadamente del 40% (**Tabla 2**). Estos diferentes valores medio de N inorgánico indican que la contribución del N orgánico a los requerimientos de la planta es probablemente más importante en la cama de pollo que en los efluentes de tambo.

El porcentaje de N orgánico que se mineraliza en la cama de pollo varía entre el 24% y el 74%, con un promedio del 51% (Qafoku et al., 2001). La cantidad real de N mineralizado puede ser estimada conociendo el contenido de N total y

de ácido úrico N ($r^2 = 0.91$; Gordillo y Cabrera, 1997a), de N soluble en agua ($r^2 = 0.87$; Qafoku et al., 2001), o usando la técnica de espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS) ($r^2 = 0.82$, Qafoku et al., 2001). Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que el N mineralizable en la cama de pollo puede variar dependiendo de las características del suelo (Gordillo y Cabrera, 1997b), observándose una mayor mineralización de N en suelos arenosos.

Para efluentes de tambo, el porcentaje de N orgánico que se mineraliza fluctúa desde -30% (indicando inmovilización de N) a 55% del N total, con un promedio del 10% (van Kessel y Reeves, 2002). A diferencia de los resultados obtenidos para la cama de pollo, el N mineralizable en los efluentes de tambo no puede predecirse a partir de su composición o del análisis NIRS (van Kessel y Reeves, 2002). Por lo tanto, el valor medio de N mineralizable N es típicamente utilizado para estimar las tasas de aplicación.

Una vez que se estima la tasa de aplicación teniendo en cuenta la cantidad de N inorgánico presente y la cantidad de N orgánico mineralizable, es necesario estimar las pérdidas potenciales a través de la volatilización de amoníaco, especialmente si estos abonos son aplicados sobre la superficie del suelo y no son incorporados. Resultados recientes sobre la aplicación en superficie de cama de pollo a pasturas a una dosis de 133 kg N ha⁻¹, mostraron pérdidas que van desde el 1% hasta el 11% del N total aplicado (5% a 78% de N amoniacal aplicado) en 28 días (Cassidy-Duffey et al., 2014). Estos mismos autores determinaron que la presión atmosférica del vapor, así como los contenidos de amonio inicial y de ácido úrico en la cama son útiles para estimar las pérdidas acumuladas de amoníaco durante 28 días después de la aplicación ($R^2 = 0.79$).

Cuando el efluente de tambos es aplicado en superficie, las pérdidas de amoníaco suelen oscilar entre cerca del 0% y 50% de N amoniacal, dependiendo en parte del contenido de materia seca y la temperatura. El aumento del contenido de materia seca de 2% a 8% y el aumento de la temperatura de 5°C a 30°C, por lo general aumentan las pérdidas de amoníaco (Sommer y Hutchings, 2001).

Amenazas

Acumulación de fósforo

Debido a que la cama de pollo y los efluentes de tambos son comúnmente aplicados para abastecer las necesidades de N, y porque sus relaciones N: P son menores que las relaciones N: P requeridas por los cultivos y forrajes, estas aplicaciones conducen típicamente a una acumulación de P en el suelo. Por ejemplo, en el norte de Georgia (EE.UU.) existe una importante industria avícola que genera alrededor de 2 millones de Mg de cama de pollo cada año, y en los últimos 30 a 40 años la mayor parte de esta cama de pollo se ha utilizado para abastecer las necesidades de N en las pasturas. Como resultado, un gran porcentaje de muestras de suelo provenientes de pasturas tienen niveles de P -Mehlich I por encima de 225 mg de P kg⁻¹ (Figura 1), el cual es mucho más alto que el nivel de P del suelo al cual no hay respuesta al agregado de P (50 mg P kg⁻¹).

El problema con la acumulación de P en el suelo es que al tener un nivel de P superior a un cierto

umbral, se produce una desorción significativa de P desde el suelo, con la consiguiente contaminación de la escorrentía superficial. En los suelos de Georgia, el nivel de 225 mg P kg⁻¹ determinado por Mehlich I es el umbral por encima del cual 1 mg P L⁻¹ aparece en la escorrentía. Esta concentración de P en la escorrentía superficial puede causar eutrofización de ríos y lagos, que además de resultar en problemas estéticos y de olor puede conducir a problemas de salud humana en áreas donde se utilizan aguas superficiales para beber. La razón de esto es que el crecimiento de algas en las aguas superficiales conduce a la acumulación de compuestos orgánicos, que cuando se tratan con cloro en las plantas de tratamiento de agua forman compuestos cancerígenos tales como los ácidos haloacéticos y los trihalometanos. Para evitar estos problemas, el manejo de estos abonos debe ser de tal modo que sólo se apliquen a dosis para reponer la absorción de P por parte del cultivo, una vez que el P en el suelo alcanzó un nivel en el cual no hay respuesta del cultivo. Cuando esta condición se alcanza en los suelos de la zona donde se encuentra la indus-

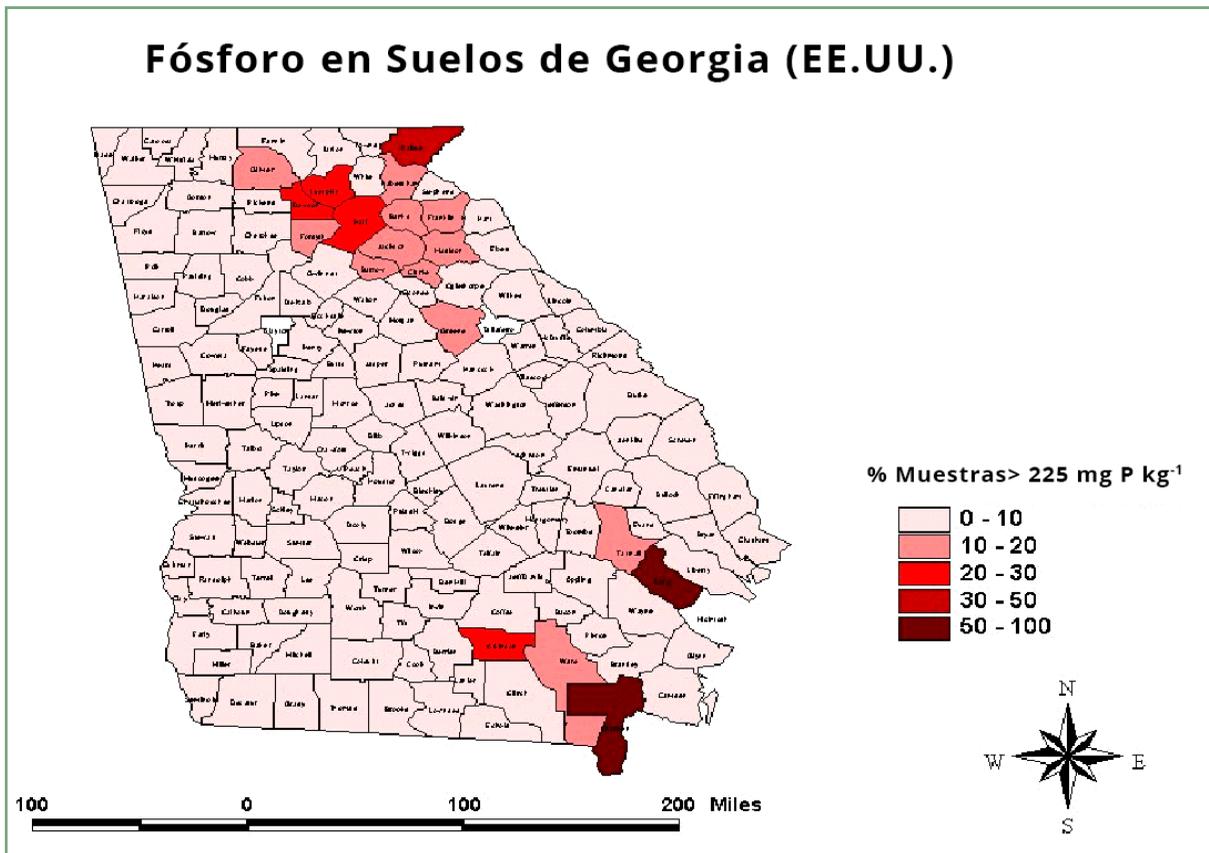


Figura 1. Porcentaje de muestras de suelo de pastura por encima de 225 mg P kg⁻¹ en Georgia, EEUU.

tria láctea o la cría de pollos para engorde, estos abonos deben ser transportados a otras áreas con necesidad de P, de manera que los problemas ambientales se puedan evitar.

Hormonas sexuales

Otras amenazas relacionadas con el uso de estos abonos son que tienen hormonas sexuales y antibióticos que pueden contaminar las aguas superficiales o pueden ser absorbidos por los cultivos o forrajes utilizados para el consumo humano o animal. Los pollos parrilleros excretan naturalmente grandes cantidades de hormonas, especialmente estradiol 17-β (la hormona femenina) y testosterona (la hormona masculina). La testosterona está usualmente presente en concentraciones dos a tres veces mayores que el estradiol 17-β (Tabla 3). Cuando se limpian los galpones de crianza de pollos parrilleros, los productores remueven la parte superior del abono apelmazado, dejando el material más viejo (limpieza parcial) o la totalidad de la cama de pollo (limpieza total). La limpieza parcial tiene mayores concentraciones de estradiol 17-β y testosterona que la limpieza completa (Tabla 3). Por lo tanto, el impacto ambiental de la limpieza parcial probablemente sea mayor que el de la limpieza completa.

Si la cama removida de los galpones de cría de pollos parrilleros es aplicada en superficie sobre pasturas o suelos sin labranza como fertilizante, se corre el riesgo de contaminación con hormonas de la escorrentía superficial lo que a su vez puede conducir a la contaminación de los arroyos,

ríos y lagos. La presencia de estas hormonas en las aguas superficiales puede tener impactos negativos en la vida silvestre y las poblaciones humanas que beben el agua contaminada (Colborn et al., 1993). Esto es especialmente cierto para el estradiol 17-β, que puede tener efectos a concentraciones tan bajas como 10 ng L⁻¹. Por el contrario, la testosterona puede tener efectos en concentraciones mucho mayores (1.000 ng L⁻¹).

Las condiciones adecuadas para las aplicaciones de la cama de pollo en el campo pueden no ser aquellas logradas inmediatamente después de una limpieza total de los galpones de cría. En consecuencia, la cama de pollo puede almacenarse en pilas durante uno o dos meses, antes de que los productores la apliquen en el campo. Trabajos recientes demostraron que esta práctica puede reducir las concentraciones de estradiol 17-β y de testosterona en un 40% a 50% (Tabla 4). Si bien la cama de pollo se somete a un calentamiento de hasta 60°C debido a la actividad biológica durante el apilado, no sufre el proceso de compostaje completo debido a que su contenido de agua es típicamente bajo. Esta puede ser la razón por la cual no se produce la descomposición completa de las hormonas durante el apilado. Una investigación en la cual una capa de abono fue compostada por 139 días, demostró una reducción de aproximadamente 90% en la cantidad de estradiol 17-β extraíble con agua y la testosterona (Hakk et al., 2005). Se debe tener en cuenta que una gran cantidad de N se pierde durante el compostaje de la cama de pollo, de modo que sólo del 4% al 5% del N orgánico remanente es mineralizable. Como resultado de esto,

Tabla 3. Concentraciones de 17-β estradiol y de testosterona en una limpieza completa (130 muestras) y parcial (51 muestras) de la cama de pollo. (Cabrera et al., resultados no publicados).

Tipo de cama	17-β Estradiol	Testosterona
	ng g ⁻¹ materia seca	
Limpieza parcial	57 a†	165 a
Limpieza total	37 b	85 b

† Dentro de cada columna, las medias seguidas por la misma letra no son significativamente diferentes según LSD de Fisher, p = 0,05.

Tabla 4. Concentraciones de hormonas al inicio y finalización del apilado de cama de pollo (4 y 8 semanas). (Cabrera et al., resultados no publicados).

Variable	Inicial	4 Semanas	8 Semanas	p>t	% Cambio
Contenido agua (g g ⁻¹ seco)	0.64	0.60	0.60		
17-β estradiol (ng g ⁻¹ seco)	103a†	49b	52b	0.0001	-50
Testosterona (ng g ⁻¹ seco)	202a	125b	128b	0.0001	-37

† Dentro de cada columna, las medias seguidas por la misma letra no son significativamente diferentes según LSD de Fisher, p = 0,05.

las tasas de aplicación de compostaje de cama de pollo para abastecer necesidades de N son mucho mayores que las tasas de la cama de pollo sin descompostar lo que implica aplicaciones de P en mucho mayor exceso que las cantidades requeridas por el cultivo.

Una vez que la cama de pollo se aplica al suelo, las hormonas presentes sufren una descomposición, pero el porcentaje descompuesto es mucho menor para el estradiol 17- β (aproximadamente 10%) que para la testosterona (aproximadamente 45%, Durant et al., 2012). Es interesante notar que en ambas hormonas, el porcentaje de descomposición es similar a capacidad de campo (-0.03 MPa) y a punto de marchitez permanente (-1.5 MPa), lo que sugiere que la mayor parte de la descomposición puede ser llevada a cabo por enzimas extracelulares.

Las hormonas sexuales que no se descomponen son incorporadas lentamente a la materia orgánica del suelo, perdiendo así su actividad. Para estradiol 17- β , el porcentaje incorporado a la materia orgánica del suelo aumenta del 26% en el día 1 hasta el 88% al día 56. Para la testosterona, el porcentaje aumenta del 26% en el día 7 al 74% al día 56 (Durant et al., 2012). Estos resultados indican que el principal período crítico, cuando estas hormonas permanecen activas en una concentración significativa es durante las primeras cuatro semanas, después de la aplicación del abono.

La cama de pollo que queda en la superficie del suelo puede contaminar la escorrentía superficial con importantes cantidades de hormonas cuando el escurrimiento se produce dentro de las primeras cuatro semanas después de la aplicación. En tres estudios recientes, sin publicar, se utilizó la simulación de lluvia para medir la concentración de estradiol 17- β y de testosterona en la escorrentía superficial en praderas fertilizadas con cama de pollo a una tasa de 4700 kg ha⁻¹. La concentración media de estradiol 17- β en la escorrentía era mayor a la de la muestra control y varió desde 27 hasta 83 ng L⁻¹. En el mismo estudio, la concentración media de testosterona osciló desde 123 hasta 206 ng L⁻¹. De estos valores, las concentraciones elevadas de estradiol 17- β son las de mayor preocupación ya que esta hormona puede tener efectos en concentraciones tan bajas como 10 ng L⁻¹.

Debido a que las hormonas sexuales presentes en la cama de pollo aplicada en superficie pueden

ser conducidas hacia las aguas superficiales a través de la escorrentía superficial, cualquier práctica de manejo que reduzca la escorrentía superficial reduciría la contaminación de las aguas superficiales. Por ejemplo, en un trabajo reciente, sin publicar, realizado en pasturas en Georgia, se observó que la aireación mecánica de la pastura (que crea pequeños surcos de unos 10 cm de profundidad) aumentó la infiltración de la lluvia, reduciendo la escorrentía superficial como así también, la cantidad de hormonas sexuales perdidas en eventos de escorrentía que se produjeron dentro de la semana después de la aplicación cama de pollo.

Con respecto al efluente de tambos, el estradiol 17- β ha sido medido en concentraciones próximas a 10 ng L⁻¹ en lagunas de decantación en industrias lácteas de California (EE.UU.) y en concentraciones de 0,1 a 0,7 ng L⁻¹ en aguas superficiales (ríos, canales de riego, drenajes) (Kolodziej et al., 2004). Del mismo modo, se encontró una actividad estrogénica equivalente a concentraciones de estradiol 17- β que van desde 0,04 hasta 3,62 ng L⁻¹ en cursos de agua situados cerca de las granjas lecheras en Inglaterra y Gales (Matthiessen et al., 2006). Estos autores concluyeron que los peces en los arroyos cercanos a las explotaciones ganaderas pueden estar en riesgo de alteración endocrina.

Antibióticos

Además de las hormonas sexuales, que son excretadas naturalmente por los pollos parrilleros y el ganado lechero, la cama de pollo y el efluente de tambo pueden tener antibióticos que son agregados a la alimentación. Monensina y salinomicina son algunos de los antibióticos más comúnmente utilizados en la industria avícola de EE.UU. Estos antibióticos pueden pasar a través del tracto digestivo de los pollos y aparecen en el estiércol. Por lo tanto, cuando se aplica la cama de pollo a la superficie del suelo, existe el riesgo de contaminación del agua con antibióticos. La presencia de estos compuestos en las aguas superficiales puede causar efectos adversos sobre la biota nativa y, potencialmente, aumentar la resistencia bacteriana a estas drogas (Boxall et al., 2003).

En un estudio reciente no publicado, la cama de pollo enriquecida con monensina (1000 mg kg⁻¹) y salinomicina (2000 mg kg⁻¹) fue almacenada en contenedores de madera (1.2 m x 1.2 m x 1.2 m)

bajo un cobertizo (con techo pero sin paredes) durante 112 días para determinar si estos antibióticos se descomponen durante el almacenaje de la cama. Los resultados mostraron que el apilado por 112 días disminuyó la concentración salinomicina en 55%, pero no afectó la concentración de monensina. Por lo tanto, el apilado de la cama de pollo por 4 a 8 semanas antes de su aplicación al suelo puede ser una buena práctica de manejo para reducir la concentración de algunos antibióticos.

Los antibióticos que persisten en la cama de pollo después del apilado pueden aparecer en la escorrentía superficial si la cama se aplica en la superficie del suelo. En un estudio reciente, no publicado, se usó la simulación de lluvia para determinar si los antibióticos presentes en la cama podían aparecer en el escurrimiento superficial de parcelas de pasturas en las que se aplicó cama de pollo en superficie. Las concentraciones medias de antibióticos en la escorrentía estaban por encima de los niveles de base y ascendieron a 1.4 mg monensina L⁻¹ y 2.5 g salinomicina L⁻¹. El mismo estudio mostró que la cama de pollo tratada con sulfato de aluminio (200 g kg⁻¹) tuvo concentraciones de antibióticos en la escorrentía próximas a la mitad de aquellas medidas en la cama de pollo sin tratar. Estos resultados indican que los antibióticos presentes en la cama de pollo pueden aparecer en la escorrentía superficial, pero las concentraciones a las cuales pueden tener un impacto ambiental no son muy conocidas hasta el momento.

Al igual que en la producción de pollos, en los tambos se utilizan una amplia variedad de antibióticos. Aunque el único antibiótico que se utiliza en la alimentación de vacas en lactación es monensina, varias otras clases de antibióticos (tales como tetraciclinas, sulfonamidas y macrólidos) se utilizan de manera profiláctica en vacas, novillos y vacas secas en las granjas lecheras (Watanabe et al., 2010). Zheng et al. (2008) encontraron concentraciones de 17-β estradiol tan altas como 2 g L⁻¹ en las aguas residuales frescas pero las concentraciones disminuyeron en 1 a 3 órdenes de magnitud a medida que el agua se movía desde el establo de ordeño a una serie de lagunas secuenciales. Como resultado de diferentes grado de atenuación desde el establo de ordeño a las lagunas, los antibióticos en las lagunas han sido detectados en un rango de 0.01 a 7.7 mg L⁻¹ (Bradford et al., 2008; Brown et al., 2006; Watanabe et al., 2010). Por otra parte, además de estar presente en las lagunas, monensina se ha detectado en el agua subterránea, poco profunda,

de las explotaciones lecheras (Watanabe et al., 2008; Zheng et al., 2008).

Como en el caso de las hormonas sexuales, la degradación de los antibióticos que son aplicados al suelo conjuntamente con el efluente de tambos varía en función de las propiedades físico-químicas de los antibióticos y de las condiciones ambientales dominantes (Kemper, 2008). También, el movimiento de los antibióticos en el suelo depende de la fuerza con la que el antibiótico se adsorbe a los componentes del suelo, tales como materia orgánica y arcilla. Por ejemplo, las tetraciclinas son fuertemente adsorbidas por lo que su movimiento es aparentemente restringido al flujo a través de macroporos o en co-transporte con coloides móviles como la materia orgánica (Kemper, 2008).

La presencia de hormonas y antibióticos en el suelo, derivados de abonos de animales, es también motivo de preocupación porque las plantas que pueden asimilarlos pueden ser posteriormente consumidas por los seres humanos o animales. No existe información acerca de la absorción de hormonas sexuales por parte de las plantas, pero se ha demostrado que la asimilación de estradiol 17-β por las ovejas preñadas puede reducir su consumo de alimento y afectar su comportamiento reproductivo (Green, 1994).

Asimismo, Kumar et al. (2005) encontraron que el maíz, la cebolla y el repollo pueden absorber clorotetraciclina. Además, Dolliver et al. (2007) demostraron que el maíz, lechuga y patata absorben sulfametazina, un antibiótico que pertenece a la clase sulfonamida. El consumo de plantas que contienen antibióticos puede aumentar la resistencia a los antibióticos por las bacterias y puede representar un riesgo para los seres humanos que son alérgicas a los antibióticos.

Resumen y conclusiones

La cama de pollo y el efluente de tambo tienen cantidades significativas de N, P y K que puede ser utilizados para fertilizar los cultivos y forrajes. El reciclaje de estos nutrientes disminuirá la contaminación del medio ambiente cuando se compara con el descarte o desecho de esos sólidos y líquidos, y permitirá utilizar nutrientes como P y K que se extraen de los depósitos geológicos que no son renovables. Para reciclar estos nutrientes es necesario determinar la tasa de aplicación correcta para cada cultivo/forraje, lo que requiere el conocimiento de los contenidos inorgánicos y orgánicos del abono, así como las estimaciones

de N mineralizable y las pérdidas esperadas a través de la volatilización de amoníaco.

Además de los nutrientes, estos abonos también tienen naturalmente hormonas sexuales como 17-β estradiol y testosterona, así como antibióticos que normalmente se añaden en la alimentación. Las hormonas sexuales y los antibióticos presentes en el abono pueden contaminar las aguas superficiales y pueden ser absorbidos por los cultivos que luego son consumidos por los seres humanos o animales. El consumo de agua o plantas contaminadas con las hormonas sexuales puede afectar el comportamiento reproductivo de los seres humanos o los animales, y el consumo de plantas que tienen antibióticos puede aumentar la resistencia a éstos por las bacterias e impactar en individuos alérgicos a los antibióticos. Debido a estos problemas potenciales, la cama de pollo y el efluente de tambo deben ser manejados para reducir su contenido de hormonas y antibióticos. Las prácticas de manejo tales como el almacenamiento de cama de pollo durante 4 a 8 semanas, el compostaje de la cama de pollo y el uso de lagunas secuenciales para el almacenamiento de efluentes, pueden lograr estos objetivos. Además, el campo agrícola que recibirá estos abonos deberá ser manejado para reducir la escorrentía superficial a fin de minimizar la contaminación de las aguas superficiales.

Referencias

Boxall, A., D. Kolpin, B. Holling-Sorensen y J. Tolls. 2003. "Are veterinary medicines causing environmental risks?" USGS Staff—Published Research. Paper 67. <http://digitalcommons.unl.edu/usgsstaffpub/67>.

Bradford, S.A., E. Segal, W. Zheng, Q. Wang, y S.R. Hutchins. 2008. Reuse of concentrated animal feeding operations wastewater on agricultural lands. *J. Environ. Qual.* S97-S115.

Brown, K.D., J. Kulis, B. Thomson, T.H. Chapman, y D.B. Mawhinney. 2006. Occurrence of antibiotics in hospital, residential, and dairy effluent, municipal wastewater and the Rio Grande in New Mexico. *Sci. Total Environ.* 366:772-783.

Cabrera, M.L., y R.M. Gordillo. 1995. Nitrogen release from land-applied animal manures. Pp 393-404. IN Steele, K. (Ed.). *Animal Waste and the Land-Water Interface*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

Cassity-Duffey, K., M. Cabrera, J. Rema, y V. Calvert II. 2014. Factors affecting ammonia loss from pastures fertilized with broiler litter. *J. Environ. Qual.* 78:1664-1673.

Colborn, T., F.S. vom Saal, y A.M. Soto. 1993. Developmental effects of endocrine-disrupting chemicals in wildlife and humans. *Environ. Health Perspect.* 101:378-384.

Dolliver, H., K. Kumar, y S. Gupta. 2007. Sulfametha-

zine uptake by plants from manure-amended soil. *J. Environ. Qual.* 36:1224-1230.

Durant, M., P.G. Hartel, M.L. Cabrera, y W.K. Vencill. 2012. 17-β estradiol and testosterone mineralization and incorporation into organic matter in broiler litter-amended soils. *J. Environ. Qual.* 41:1923-1930.

Gordillo, R.M., y M.L. Cabrera. 1997a. Mineralizable nitrogen in broiler litter: I. Effect of selected litter characteristics. *J. Environ. Qual.* 26:1672-1679.

Gordillo, R.M., y M.L. Cabrera. 1997b. Mineralizable nitrogen in broiler litter: II. Effect of selected soil characteristics. *J. Environ. Qual.* 26: 1679-1686.

Green, D.A., D.R. Brink, y M.L. Bauer. 1994. Characterization of feed intake and 17-β estradiol during gestation and lactation in twin-bearing ewes. *Small Ruminant Res.* 13:153-158.

Hakk, H., P. Millner, y G. Larsen. 2005. Decrease in water-soluble 17β-estradiol and testosterone in composted poultry manure with time. *J. Environ. Qual.* 34:943-950.

Kemper, N. 2008. Veterinary antibiotics in the aquatic and terrestrial environment. *Ecol. Indicators* 8:1-13.

Kolodziej, E.P., H. Harter, y D.L. Sedlak. 2004. Dairy wastewater, aquaculture, and spawning fish as sources of steroid hormones in the aquatic environment. *Environ. Sci. Technol.* 38:6377-6384.

Kumar, K., S.C. Gupta, S.K. Baidoo, Y. Chander, y C.J. Rosen. 2005. Antibiotic uptake by plants from soil fertilized with animal manure. *J. Environ. Qual.* 34:2082-2085.

Matthiessen, P., D. Arnold, A.C. Johnson, T.J. Pepper, T.G. Pottinger, y K.G.T. Pulman. 2006. Contamination of headwater streams in the United Kingdom by oestrogenic hormones from livestock farms. *Sci. Total Environ.* 367:616-630.

Qafoku, O., M.L. Cabrera, W.R. Windham, y N.S. Hill. 2001. Rapid methods to determine potentially mineralizable nitrogen in broiler litter. *J. Environ. Qual.* 30:217-221.

Smit, A.L., P.S. Bindraban, J.J. Schr der, J.G. Conijn, y H.G. van der Meer. 2009. Phosphorus in agriculture: global resources, trends and developments. Report 282, Plant Research International, Wageningen.

Sommer, S.G., y N.J. Hutchings. 2001. Ammonia emission from field-applied manure and its reduction – invited paper. *European J. Agron.* 15:1-5.

Roberts, T.L., y W.M. Stewart. 2002. Inorganic phosphorus and potassium production and reserves. *Better Crops* 86:6-7.

Van Kessel, J.S., y J.B. Reeves III. 2002. Nitrogen mineralization potential of dairy manures and its relationship to composition. *Biol. Fertil. Soils* 36:118-123.

Villalba, G., Y. Liu, H. Schroder, y R.U. Ayres. 2008. Global phosphorus flow in the industrial economy from a production perspective. *J. Ind. Ecol.* 12:557-569.

Watanabe, N. y T. H. Harter. 2008. Environmental occurrence and shallow ground water detection of the antibiotic monensin in dairy farms. *J. Environ. Qual.* 37:S78-S85.

Watanabe, N., B.A. Bergamaschi, K.A. Loftin, M.T. Meyer, y T. Harter. 2010. Use and environmental occurrence of antibiotics in freestall dairy farms with manured forage fields. *Environ. Sci. Technol.* 44:6591-6600.

Zheng, W., S.R. Yates, y S.A. Bradford. 2008. Analysis of steroid in a typical dairy waste disposal system. *Environ. Sci. Technol.* 43:530-535. ■

[volver al índice](#)

La Compactación de los Suelos bajo Agricultura

Carina R. Alvarez y Patricia L. Fernández

Facultad de Agronomía, UBA. Av. San Martín 4453, CABA.

*Correo electrónico: calvarez@agro.uba.ar

La definición de una buena calidad física edáfica refiere a un ambiente favorable para el desarrollo de las raíces y de la biota del suelo, a una adecuada capacidad para amortiguar déficits hídricos y, a su vez, a una alta resistencia a la degradación por acción de agentes externos. La calidad física del suelo está determinada genéticamente (calidad intrínseca), y a su vez es modificada por el manejo antrópico (calidad dinámica o salud del suelo) (Alvarez y Taboada, 2008).

Un ambiente favorable para el desarrollo radical significa que el suelo esté, entre otras condiciones, libre de impedancias mecánicas. El término impedancias mecánicas se relaciona con la existencia de capas de suelo con elevadas resistencias, o densidades aparentes, o estructuras desfavorables (masiva o granular), las cuales son capaces de afectar negativamente y/o impedir el crecimiento de los cultivos a través de efectos directos (e.g. menor emergencia de plántulas; menor crecimiento de raíces) e indirectos (e.g. menor absorción de nutrientes).

Los suelos bajo producción agrícola y/o ganadera están expuestos a la aplicación de fuerzas de estrés debido al tránsito de maquinaria o de animales. En la región pampeana, los sistemas agrícolas, e incluso los sistemas mixtos, se manejan en una alta proporción bajo siembra directa (SD), siendo el tránsito de maquinarias y el pisoteo animal los factores que conducen a la compactación de los suelos. Anteriormente, en ésta región era importante la presencia de pisos de arado y el encostramiento superficial de los suelos asociados a la labranza convencional (LC).

En el sistema de SD se pueden distinguir dos zonas o profundidades de compactación: i) una que se ubica más superficialmente, la cual en sistemas laboreados es borrada por la labranza; y ii) otra más profunda en el perfil, presente en cualquier tipo de sistema de labranza. La compactación superficial esta más asociada a la presión que ejerce el tránsito y la consolidación de las partículas, mientras que la compactación profunda se relaciona más con el peso del agente

que aplica el estrés. En SD, se observa un leve aumento de la densidad aparente y un importante aumento de la resistencia a la penetración (**Figura 1; Figura 2**) (Alvarez y Steinbach, 2009; Alvarez et al., 2009; 2012). De Battista et al. (2005) evaluaron la estructura del suelo a través del método de perfil cultural. Por ejemplo, en un sistema bajo 7 años de agricultura en SD observaron una capa superficial, de 3 cm de espesor, de tierra fina y restos vegetales, con una estructura favorable con terrones individualizados (F; **Figura 3**), presentándose luego una capa continua de 4-6 cm de espesor con estructuras laminares, de baja porosidad y caras de ruptura lisas (MΔ). La capa subsiguiente se corresponde con una capa que presenta zonas de terrones adheridos en grados crecientes (desde SF a SD) hasta masivos (MΓ) con características de porosidad cada vez menos visible y caras más lisas producto de la acción mecánica (desde Γ a Δ). La estructura laminar hallada en sistemas de SD produce un efecto negativo sobre la infiltración de agua al suelo (Alvarez et al., 2014) y sobre el crecimiento de las raíces. Esta compactación superficial es más fácil de prevenir y corregir que la compactación más profunda, ya que la corrección de esta última requiere mayor energía y los mecanismos ligados a la materia orgánica o a la actividad biológica están restringidos a los estratos más superficiales.

Existen distintas estrategias para manejar la compactación en suelos agrícolas basadas en su prevención o en su remediación. En la **Figura 4** se presentan las diferentes opciones de manejo desde cada una de las estrategias. Entre ellas se encuentran el tránsito controlado, aplicar menor presión de neumáticos, el momento del tránsito, la descompactación, el aumento del contenido de materia orgánica, actividad de raíces, entre otras (**Figura 4**).

Para conocer el beneficio económico de aplicar éstas estrategias es necesario por un lado, conocer el costo de la práctica y, por el otro, el impacto de la compactación sobre el rendimiento y/o el aumento que produce ésta en los costos de

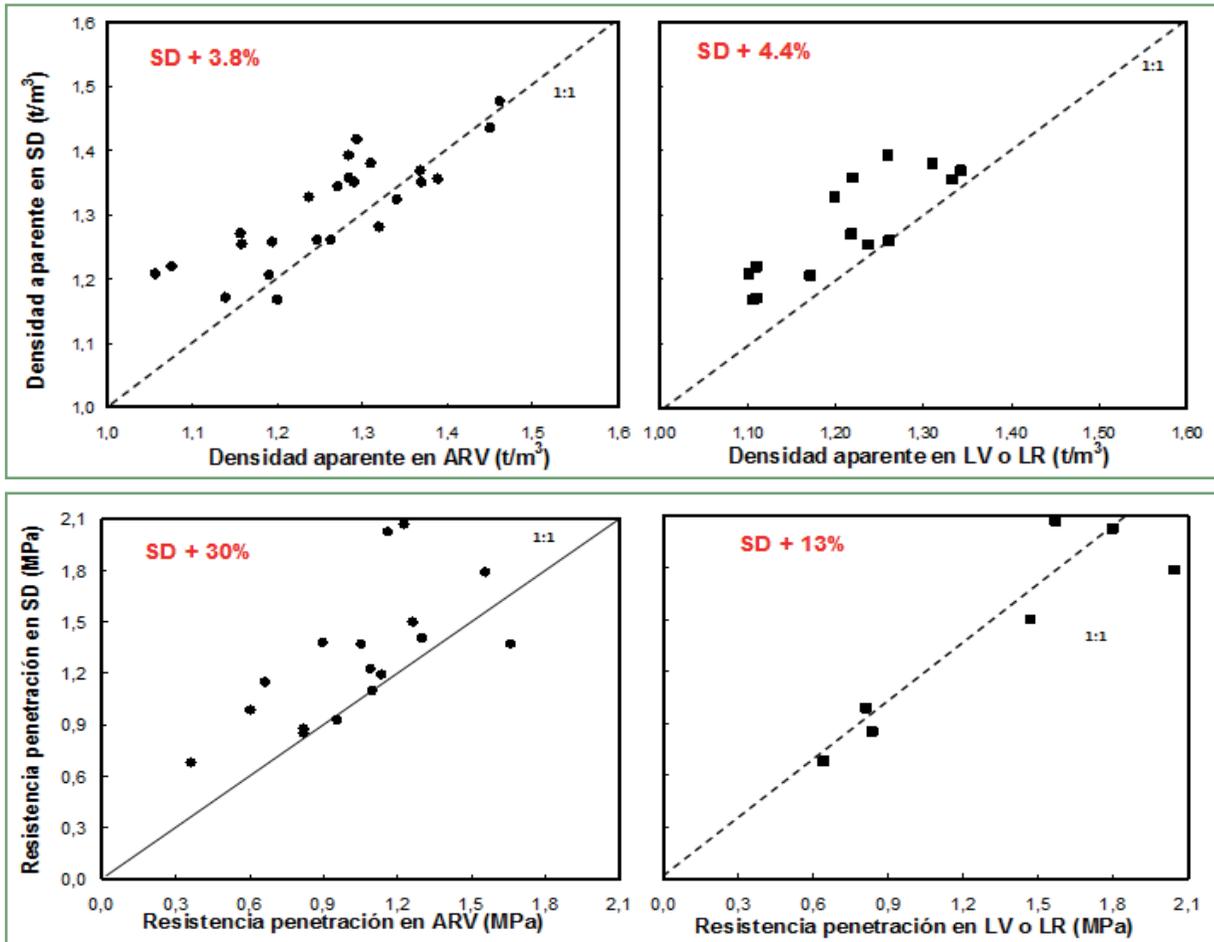


Figura 1. Densidad aparente e índice de cono (resistencia a la penetración) en suelos bajo labranza de arado y vertedera (ARV) o labranza vertical (LV) y labranza reducida (LR) vs. siembra directa (SD) en ensayos de larga duración en la región pampeana La línea corresponde a la relación 1:1. Adaptado de Alvarez y Steinbach, (2009).

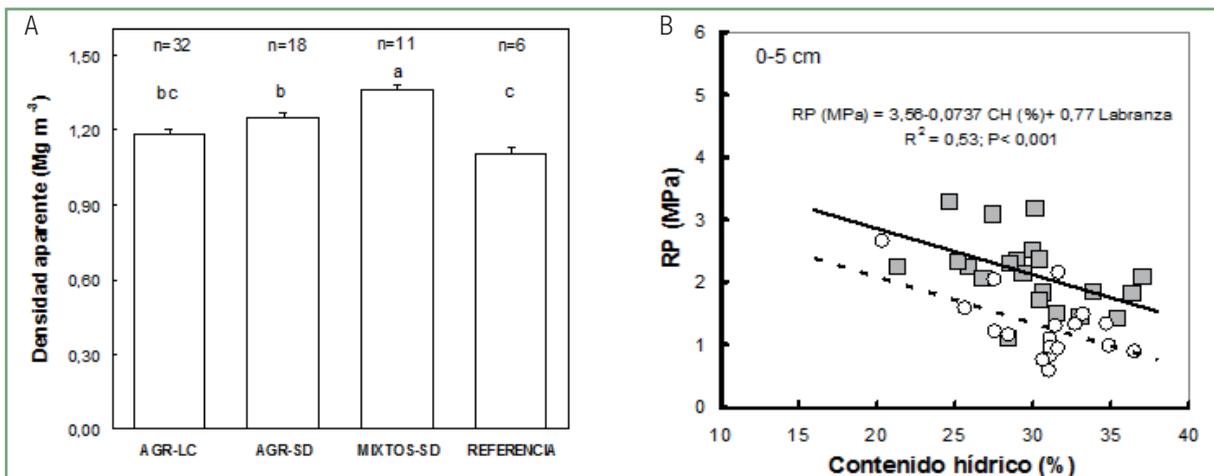


Figura 2. A. Densidad aparente de 0-15 cm en la región pampeana norte en lotes bajo distintos manejos (AGR-LC: agricultura continua con laboreo; AGR-SD: agricultura continua en siembra directa; MIXTOS-SD: sistema agrícola-ganaderos en SD y Referencia: situaciones cuasi prístinas (cascos). Adaptado de Alvarez et al. (2012) B. Resistencia a la penetración (RP) y su relación con la humedad del suelo en suelos laboreados (círculos) o siembra directa (cuadrados). Adaptado de Alvarez et al. (2009)

producción (mayor requerimiento de fertilizantes, o energía en la siembra).

Una revisión realizada a nivel mundial presenta el incremento del rendimiento comparando situaciones sin tránsito respecto de situaciones bajo tránsito convencional (Chamen et al., 2015). Se puede observar que el impacto es variable entre los cultivos analizados (Figura 5), siendo también distinto según el tipo de suelo y clima. Asimismo, estimaron el aumento o disminución de los márgenes brutos de distintas estrategias de mitigación y corrección de la compactación sobre el cultivo de trigo, mostrando variaciones positivas y mayores de las prácticas de prevención sobre las de remediación (Figura 6).

A continuación se presentarán ejemplos de dos evaluaciones económicas locales, una de preven-

ción y otra de remediación de la compactación. En un trabajo de Botta et al. (2007) se propone un ensayo con estrategia de prevención, con distintos ordenamientos del tránsito en el lote durante la operación de cosecha. El ensayo se realizó en un argiudol típico de la Pampa Ondulada y consideraba tres intensidades de tránsito. El lote fue manejado en SD en los últimos 9 años y se realizaba doble cultivo trigo/soja de segunda, a excepción de los años evaluados donde solamente se realizó soja de primera. En la Figura 7 se describen los distintos diseños propuestos para la cosecha, y en la Tabla 1 se describe la intensidad de tránsito aplicada, la capacidad operativa y el consumo de combustible en cada caso. En la Figura 8 se muestra el rendimiento medio de tres años de evaluación (Campañas 2004/05, 2005/06

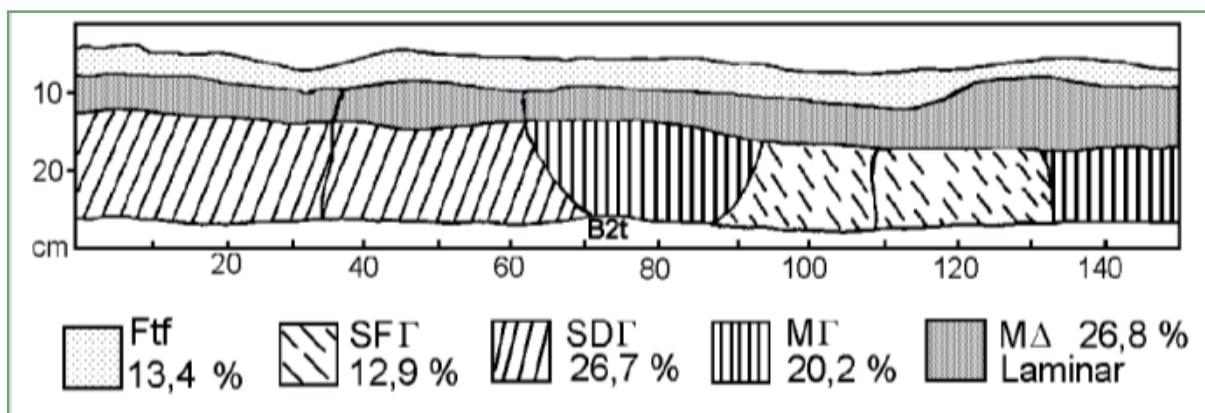


Figura 3. Evaluación estructural de suelos bajo agricultura continua en siembra directa. Extraído de De Batista et al. (2005). F: SF: SD: M: masiva; MΔ laminar.

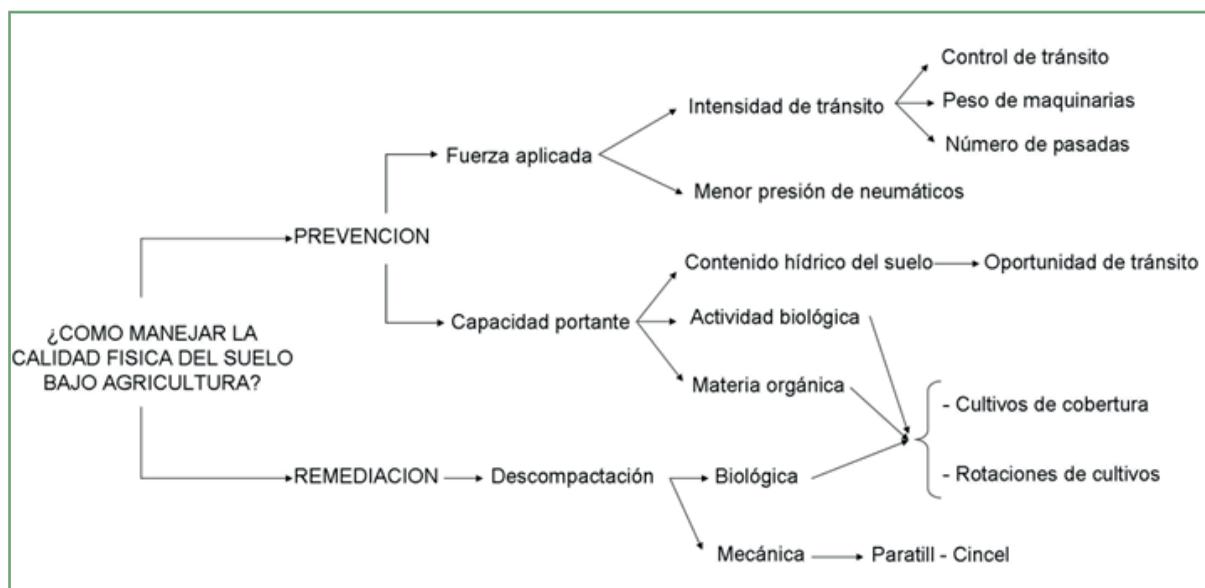


Figura 4. Estrategias de prevención y remediación de la compactación.

y 2006/07). Los dos tratamientos que ordenaron la cosecha no presentaron diferencias entre ellos. Los autores concluyen la conveniencia económica del ordenamiento del tránsito derivada del aumento de rendimiento y del menor consumo de gasoil, a pesar de que disminuye la capacidad operativa.

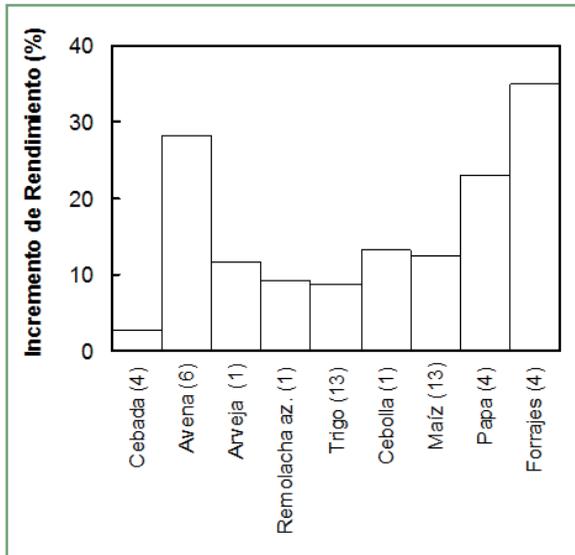


Figura 5. Aumento del rendimiento atribuible a la ausencia de tránsito (comparando situaciones sin tránsito y con tránsito normal). Entre paréntesis se indica el número de ensayos considerados. Adaptado de Chamen et al. (2015).

Tabla 1. Intensidad de tránsito, consumo de combustible y capacidad operativa de los tratamientos aplicados en Botta et al. (2007).

Tratamiento	Intensidad de tránsito (Mg km ⁻¹ ha ⁻¹)	Consumo de combustible (l ha ⁻¹)	Capacidad operativa (ha h ⁻¹)
1	38.45	7.6a	5.91a
2	20.11	5.5b	5.36b
3	15.2	4.9b	5.09b

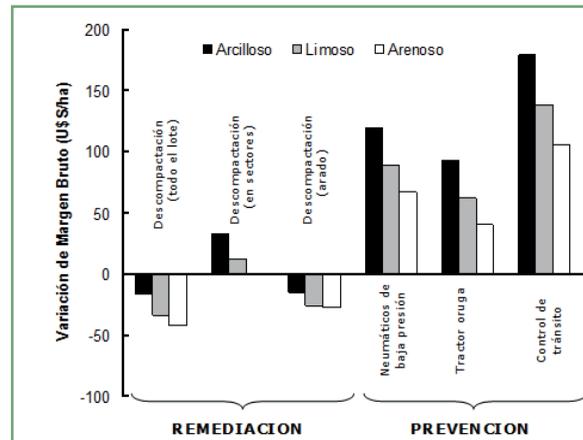
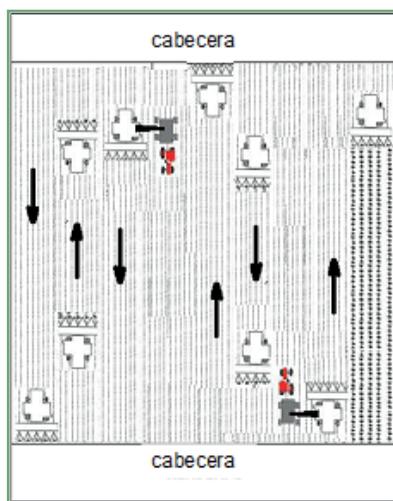
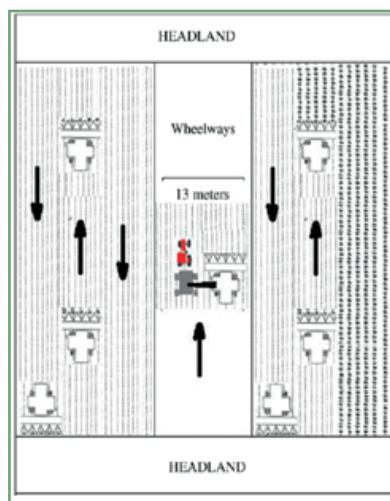


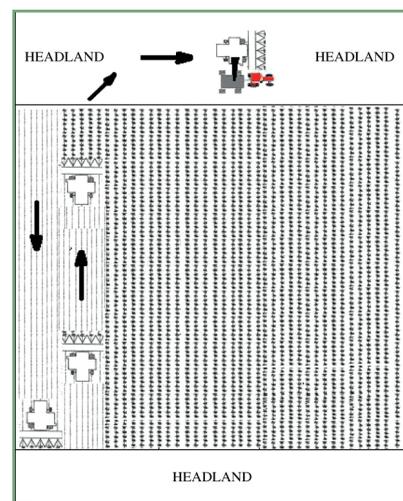
Figura 6. Variación del margen bruto para trigo con distintas prácticas de remediación o prevención de la compactación. Adaptado de Chamen et al. (2015).



El lote está sometido al libre tránsito con una intensidad de tránsito de 38.45 Mg km⁻¹ ha⁻¹.
Consumo combustible: 7.6 l ha⁻¹.
Capacidad operativa: 5.91 ha h⁻¹.



La cosechadora descarga en la tolva mientras las máquinas están circulando en una calle de 13 m en el centro del lote con una intensidad de tránsito de 20.11 Mg km⁻¹ ha⁻¹. Consumo combustible: 5.5 l ha⁻¹.
Capacidad operativa: 5.36 ha h⁻¹.



La cosechadora descarga en la tolva en la cabecera con una intensidad de tránsito de 15.2 Mg km⁻¹ ha⁻¹. Consumo combustible: 4.9 l ha⁻¹. Capacidad operativa: 5.09 ha h⁻¹.

Figura 7. Diseños de la operación de cosecha y distintas características correspondiente al ensayo realizado por Botta et al. (2007).

Según se indicó en la **Figura 4** dentro de las medidas de corrección de la compactación esta la descompactación mecánica. La detección de compactación o endurecimiento superficial en SD y una menor infiltración -visualizada muchas veces en forma de encharcamiento temporal- ha llevado a proponer el uso de descompactadores en la región pampeana como una estrategia de remediación. A lo largo de la última década se realizaron distintos ensayos especialmente en los cultivos de maíz y soja (**Tabla 2**). Se utilizaron diversos implementos como paratill, paraplow, cultivie, cincel, inclusive prototipos diseñados en distintas localidades. Para el cultivo de soja se recopilaron 4 ensayos y en promedio presentaron un incremento del rendimiento cercano al 6%. Para maíz se cuenta con un número mayor de ensayos. Parte de los mismos presentan respuestas positivas y, en ese caso, el incremento de rendimiento es cercano al 7%. Mientras que se registraron 4 casos de impacto negativo, 3 de ellos corresponden a la pampa arenosa en situaciones de loma.

En resumen, se observa un bajo impacto de la descompactación sobre el rendimiento, a lo que se suma el costo de la práctica. Uno de los efectos negativos de una labor de descompactación es dejar al suelo más vulnerable (menor capacidad portante) a la aplicación de nuevos estreses compactantes. El tiempo de recompactación depende del manejo posterior del tránsito. En general, aún a la cosecha del cultivo de maíz, se observó que el suelo presentaba efectos de la labor de descompactación realizada meses atrás. Por otro

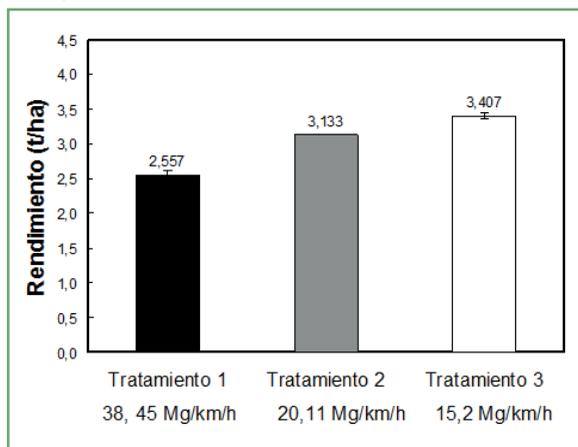


Figura 8. Rendimiento medio del cultivo de soja de los tres años de ensayo (2004/05, 2005/06 y 2006/07) para las tres intensidades de tránsito (Botta et al., 2007). Las barras verticales indican el error estándar y se presenta el valor de la media de cada tratamiento.

lado, el escenario hídrico a cosecha suele ser muy húmedo, realizando ésta operación con el suelo en condiciones de mínima capacidad portante.

Un escenario de alta intensidad de tránsito (no controlado) y altos rendimientos del maíz (incrementos en el peso de la maquinaria) generalmente contribuye a determinar una baja residualidad de la práctica de descompactación. De los resultados obtenidos, surge la importancia de practicar una estrategia preventiva de la recompactación luego del pasaje del implemento, para extender la residualidad de la práctica. Entre ellos, cabe mencionar: i) evitar el tránsito con baja capacidad portante del suelo, ii) controlar el tránsito (minimizar el área transitada), y iii) consolidar la estructura porosa del suelo a partir del entramado de raíces.

Finalmente, para el manejo de la calidad física de los suelos en siembra directa, se recomienda:

- Aplicar medidas preventivas de la compactación a través del control de tránsito agrícola y, transitar con buena capacidad portante del suelo (altos contenidos de materia orgánica, no transitar cuando el suelo se encuentra cercano al contenido hídrico crítico).
- Propiciar la presencia de raíces vivas que aseguren la agregación por entramado radical, el cual parece ser un mecanismo de importancia para la buena estructuración de suelos limosos con arcillas no expansibles. Surge de los ensayos de la región que el suelo debería contar con raíces vivas a lo largo del mayor tiempo posible según la región (cultivos de cobertura, doble cultivo).

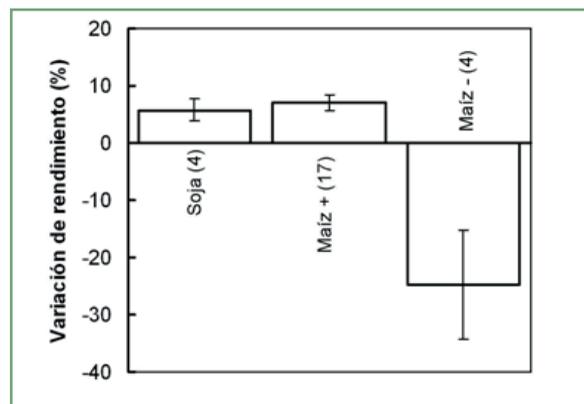


Figura 9. Variación porcentual del rendimiento por descompactación en soja y maíz. La fuente de los datos se presenta en la Tabla 2. En el caso de maíz se separó en respuesta positiva (Maíz +) y negativa (Maíz -).

Tabla 2. Características de los ensayos de descompactación.

Autores	Región	Suelo	Nº ensayos/sitios	Profundidad (cm)	Cultivo
Mon e Irurtia (2006)	P. Ondulada	Argiudol Típico	1	35	soja
Vallejos et al. (2014)	SE (Tres Arroyos)	Paleudol petrocalcico	1	29	soja
Cerliani et al. (2014)	Sur de Córdoba	s/d	3	27,5	soja
Gerster et al. (2010)	P. Ondulada	Argiudol Típico	1	25	soja
Alvarez et al. (2013)	P. Ondulada	Hapludol/Argiudol	12	30-45	maíz
Rovera et al. (2014)	R. Semiárida	Haplustol Udico	1	27	maíz
Richmond et al. (2010)	P. Arenosa	Haplustol Entico	2	25-40	maíz
Cerliani et al. (2012)	R. Semiárida	s/d	1	25-30	maíz

- Aplicar prácticas tendientes a aumentar o mantener el contenido de materia orgánica del suelo, las cuales son las mismas que promueven la agregación por entramado.
- Si se aplican medidas correctivas como la descompactación, asegurar su persistencia con un buen manejo pos-práctica, aplicando todas las medidas preventivas posibles descriptas en el ítem anterior.

Porque después de todo “Es mejor prevenir que curar”

Bibliografía

Alvarez, C.R., P.L. Fernández, y M.A. Taboada. 2012. Relación de la inestabilidad estructural con el manejo y propiedades de los suelos en la región pampeana. *Ciencia del Suelo*. 30: 173-178.

Alvarez, C.R., P.L. Fernández, y M.A. Taboada. 2013. Condiciones físicas edáficas de sustentabilidad en sistemas agrícolas pampeanos. *Primeras Jornadas Nacionales de Suelos de Ambientes Semiáridos y Segundas Jornadas Provinciales de Agricultura Sustentable*, 20-21 de septiembre, Mercedes, San Luis.

Alvarez, C.R., M.A. Taboada, F.H. Gutiérrez Boem, A. Bono, P.L. Fernández, y P. Prystupa. 2009. Topsoil properties as affected by tillage systems in the Rolling Pampa region of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 1242-1250.

Alvarez, C.R., y M.A. Taboada. 2008. Capítulo 6. Indicadores de la fertilidad física del suelo. pp. En: M.A. Taboada, C.R. Álvarez (eds.). *Condición física del suelo y su relación con la fertilidad*. Editorial Facultad de Agronomía UBA. Buenos Aires.

Alvarez, R., y H.S. Steinbach. 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil and Tillage Research* 104: 1-15.

Alvarez, CR; Taboada MA; Perelman S; Morrás H. 2014. Topsoil structure in no-tilled silty loam soils in the Rolling Pampas, Argentina. *Soil Research*, 52; 533-542.

Botta, G.F., O. Pozzolo, M. Bomben, H. Rosatto, D. Rivero, M. Ressia, M. Tourn, E. Soza, y J. Vázquez.

2007. Traffic alternatives for harvesting soybean (*Glycine Max L.*). Effect on yields and soil under a direct sowing system. *Soil and Tillage Research*. 96: 145-154.

Cerliani, C. G.P. Espósito, G.R. Balboa, C.A. Castillo, y R.G. Balboa. 2012. Sistema radical de maíz y soja y descompactación subsuperficial del suelo. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, XXIII Congreso Argentino de Ciencia del Suelo, Mar del Plata.

Cerliani, C., F. Malatini, G. Balboa, C. Cholaky, y G. Espósito. 2014. Producción de soja y descompactación del suelo en el sur de Córdoba. XXIV Congreso Argentino de Ciencia del Suelo, Bahía Blanca.

Chamen, W.C.T., A.P. Moxey, W. Towers, B. Balana, P.D. Hallet. 2015. Mitigating arable soil compaction: a review and analysis of available cost and benefit data. *Soil and Tillage Research*. 146: 10-25.

De Battista, J.J., C. Pecorari, y R. Albrecht. 2005. Evaluación del estado estructural de suelos con agricultura continua en siembra directa. *Indicadores de calidad de suelos*. Boletín Técnico 4, Estación Experimental Agropecuaria General Villegas: 31-39.

Gerster, G., S. Bacigaluppo, M. Bodrero, F. Salvagioti. 2010. Secuencia de cultivos, descompactación mecánica y rendimiento de soja en un suelo degradado de la región pampeana. XXII Congreso Argentino de Ciencia del Suelo, Rosario.

Mon, R., y E.C. Irurtia. 2006. Recuperación de la productividad de suelos degradados mediante el subsolado con agregado de yeso.

Richmon, P., C.B. Irurtia, R. Mon, N. González, J. Elisei, y G. Tellería. 2010. Efectos de la descompactación del suelo en diferentes posiciones del relieve en condiciones de sequía. XXII Congreso Argentino de Ciencia del Suelo, Rosario.

Rovera, J., C. Cholaky, J. Cisneros, J. González, y L. Beresio. 2014. Descompactación y dirección de siembra: efecto sobre propiedades hídricas y rendimientos de maíz. XXIV Congreso Argentino de Ciencia del Suelo, Bahía Blanca.

Vallejos, A., M. Kees, P. Bondia, N. Echeverría, J. Silenzi, C. Zajac, y M. De Lucia. 2014. Subsolado en siembra directa: efectos sobre parámetros físicos del suelo y el rendimiento de soja. *Ciencia Suelo*. 32: 291-300.

[volver al índice](#)

La materia orgánica de los suelos agrícolas: Formación, evolución y manejo.

Gervasio Piñeiro^{1,2}, Sebastián Mazzilli², Priscila Pinto¹ y Paola Ecclesia³

¹ IFEVA-Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, CONICET.

² Facultad de Agronomía, Universidad de la Republica, Uruguay.

³ INTA, EEA Paraná.

*Correo electrónico: pineiro@agro.uba.ar

Entender cómo cambia el flujo de energía, materia e información en un agroecosistema como resultado de su manejo, es clave para evitar su deterioro (Odum 2007). Los agroecosistemas son complejos y por ende presentan múltiples relaciones entre sus componentes. Muchas veces, nuestro objetivo de manejo es simplificar el agroecosistema para poder manejar grandes extensiones. Sin embargo, esta simplificación o la falta de una visión sistémica del mismo, provoca en general un deterioro del mismo y una falta de sustentabilidad a largo plazo (Rositano y Ferraro, 2013). La eficaz captura de recursos (luz, nutrientes, etc.) resulta imprescindible para poder diseñar agroecosistemas que mejoren y mantengan la productividad en el tiempo (Caviglia y Andrade, 2010).

El manejo de nutrientes de los cultivos debe ser pensado a escala de ecosistema y no solamente según la demanda y respuesta cultivo como se realiza actualmente. La materia orgánica del suelo es la principal fuente de nutrientes de los cultivos. Su pérdida conduce a una disminución de la oferta de nutrientes desde el suelo como nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S), entre otros; y a una reducción en los rendimientos de los cultivos. La pérdida de materia orgánica del suelo en sistemas agrícolas es un proceso mundialmente y localmente conocido (Figura 1) (Álvarez, 2001; Guo y Gifford, 2002). Tradicionalmente, este deterioro fue remediado mediante el agregado de fertilizantes, utilizando un enfoque a escala de cultivo. Es decir, considerando los requerimientos y las respuestas de los cultivos.

Sin embargo, en un enfoque a escala de ecosistema nos podríamos preguntar: ¿Cuánta materia orgánica del suelo es necesaria para “alimentar” al cultivo propuesto y su nivel de rendimiento? Este enfoque cambia radicalmente el eje de análisis, ya que apunta a estrategias de manejo de largo plazo

orientadas a nutrir el suelo y alcanzar los niveles de materia orgánica deseados, en vez de nutrir solamente al cultivo. Este enfoque representaría además ventajas en términos de otros aspectos del ecosistema (compactación, retención de agua en el suelo, control de malezas, etc.). La mayoría de los aspectos del manejo del ecosistema deberían ser considerados a esta escala y no solo a escala de cultivo o planta (i.e.: manejo de plagas y enfermedades) (Piñeiro et al., 2014).

La materia orgánica del suelo es un componente clave del flujo de energía y del ciclo de los nutrientes en los agroecosistemas. Entender su dinámica de formación y descomposición es de vital importancia ya que presenta implicancias prácticas para el manejo de los agroecosistemas y el secuestro de carbono (C) en los suelos (Álvarez, 2001; Guo y Gifford, 2002). La materia orgánica del suelo es compleja y heterogénea lo cual ha dificultado enormemente el estudio de su dinámica (Cambardella y Elliott, 1993). Sin embargo, avances recientes en técnicas y equipos han permitido comprender la complejidad de la misma y su dinámica. El uso de isotopos estables de C (13C) y N (15N) como trazadores es cada vez

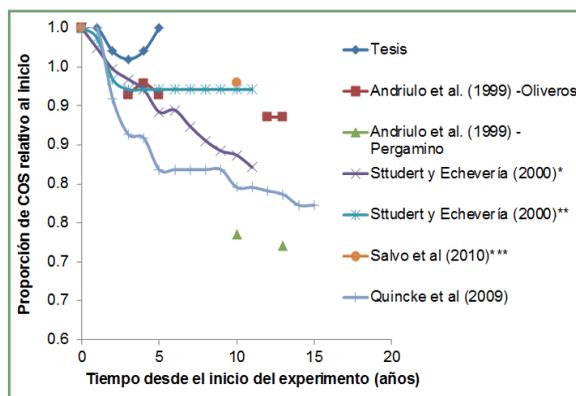


Figura 1. Cambios relativos en la cantidad de carbono orgánico del suelo en distintos experimentos de larga duración de la región (Tomado de Mazzilli, 2015).

mas frecuente en estudios de la materia orgánica del suelo (Ceri et al., 1985). Esta técnica permite seguir o estimar los flujos de C y N entre distintos componentes del ecosistema. La combinación de ambas técnicas esta permitiendo comprender aspectos clave de los flujos de entrada y salida de ambos nutrientes al suelo.

Estas nuevas técnicas nos han permitido cuantificar la humificación de las raíces de los cultivos, la cual es muy superior a la de los residuos aéreos. Esto significa que un gramo de raíces forma unas 10 a 30 veces más materia orgánica que un gramo de biomasa aérea, dependiendo del ambiente y de las especies vegetales (Mazzilli et al., 2014; Mazzilli, 2015). En cultivos de maíz, del 100% de la biomasa producida, la mayoría se va a grano, una porción similar a tallos y hojas y menos del 10% se destina a las raíces (Figura 2). En términos generales, estos números son similares para soja y el resto de los cultivos extensivos, provocando bajos aportes de carbono al suelo vía raíces. En términos generales, cerca de un 1% de la biomasa aérea se humifica, mientras que alrededor del 20% al 30% de la biomasa subterránea logra humificarse (Figura 2) (Mazzilli et al., 2015).

Estos resultados sugieren que realizar cultivos que produzcan mayor cantidad de raíces o incluso realizar mejoramiento genético incluyendo este carácter (alta producción de raíces) podría aumentar sustancialmente la formación de materia orgánica del suelo. En este último punto, el mejoramiento genético ha sido orientado clásicamente a mayores rendimientos, sin mirar otros

caracteres como la producción de raíces, y por eso las producciones de raíces de los cultivos son en general inferiores a los de plantas no mejoradas. Si bien existe cierto compromiso en la asignación de recursos, existen trabajos que muestran que se pueden seleccionar a la vez mayores producciones de raíces e incrementar los rendimientos (Kell, 2011; Glover et al., 2007).

El N es un elemento clave para secuestrar C y aumentar la materia orgánica del suelo. Algunos resultados recientes nacionales e internacionales, muestran que se ha producido un aumento en la cantidad de residuos o retorno de C y nutrientes por parte de los cultivos al suelo (Mazzilli, 2015; Berhongaray et al., 2013). La soja como leguminosa además aporta residuos de alta calidad (baja relación C:N), sin embargo aporta una baja cantidad y produce una alta extracción de N, principalmente. A pesar de esto la rotación de gramíneas y leguminosas, y principalmente el doble cultivo trigo/soja de segunda, provoca un mejor aporte total de residuos y de alta calidad (si hay leguminosas en la rotación). Esto, más la siembra directa, podría estar explicando algunos de los cambios favorables observados en sitios sin erosión y con alta frecuencia de dos cultivos por año (Figura 1, línea correspondiente a tesis de S. Mazzilli).

Considerar solamente las entradas por fertilizantes y salidas por cosecha, si bien es un avance, no alcanza para mantener los nutrientes en el suelo. Se debería realizar un balance más detallado de los nutrientes a escala de todo el ecosistema y en

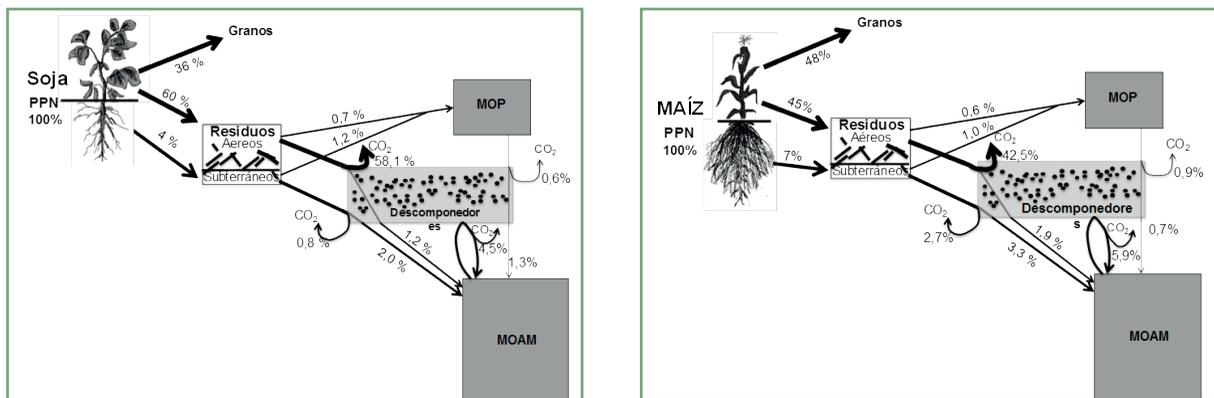


Figura 2. Diagrama del flujo de carbono en un cultivo de soja y otro de maíz. Los valores de los flujos están expresados como porcentaje de la productividad primaria neta anual del cultivo. El grosor de las flechas es relativo al tamaño del flujo. PPN: productividad primaria neta; MOP: materia orgánica particulada; MOAM: materia orgánica asociada a minerales (Tomado de Mazzilli, 2015).

el mediano-largo plazo, principalmente conociendo las pérdidas (lixiviación, volatilización, etc.), y las asincronías entre mineralización (aumentos en la disponibilidad de nutrientes) y la captura por plantas o microorganismos. En esos desfases o asincronías es cuando se producen las pérdidas de nutrientes y en donde deben estudiarse alternativas de manejo que logren evitarlas.

La intensificación, en términos de dos o más cultivos al año, podría ser un intento de lograr capturar mayor energía en el ecosistema. En general, la realización de un cultivo al año conduce a que una gran parte del año no se intercepta energía en el ecosistema (ver soja y maíz en **Figura 3**). En comparación con cultivos perennes, los cultivos anuales presentan mayores picos de intercepción de energía, pero menores intercepciones totales de energía a escala anual, salvo cuando se realizan dobles cultivos como el trigo-soja (**Figura 3**). A pesar de ello, la mayoría del área agrícola argentina presenta un solo cultivo al año (**Figura 4**). Es necesario agregar nuevos cultivos en las rotaciones para intentar capturar energía y nutrientes todo el año, evitando sus pérdidas (Piñeiro et al., 2014). La energía capturada podrá ser empleada en funciones vitales del ecosistema (por ejemplo mantener la vida en el suelo, fijar nitrógeno atmosférico, o descompactar el suelo, entre otras). La captura de nutrientes evita sus pérdidas y permite su reutilización. Es por ello que podemos pensar en la realización de distintos cultivos que llamaremos “cultivos para servicios”, ya que nos proveen un servicio distinto, pero complementario, al cultivo de cosecha (Piñeiro et al., 2014).

En la teoría ecológica reciente, se definen a los servicios ecosistémicos como todos aquellos

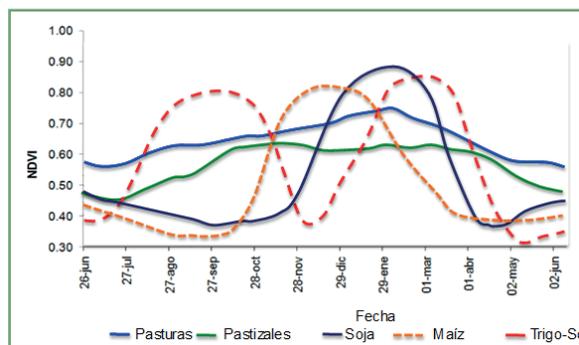


Figura 3. Variación anual del Índice verde normalizado (un estimador de la captura de energía solar) de distintos recursos forrajeros y cultivos.

servicios o utilidades que nos brindan los ecosistemas. Un servicio clave de los ecosistemas es el de provisión de granos, para el cual realizamos la mayoría de nuestras modificaciones del ecosistema (sembrar cultivos, etc.). Sin embargo, el ecosistema puede proveer otros servicios (que tal vez aun no tienen valor de mercado, aunque si tienen un costo para recuperarlo), como la regulación del ciclo del N, o la polinización. La magnitud relativa en la provisión de distintos servicios ecosistémicos por parte de los cultivos o de los ecosistemas naturales se puede mostrar gráficamente como en la **Figura 5** (Piñeiro et al., 2014). Estos diagramas sirven para visualizar la provisión de servicios de distintas alternativas de cultivos como se detalla a continuación.

El deterioro del ecosistema asociado a la falta de provisión de algunos de los servicios listados en la **Figura 5**, ha llevado a que en los últimos años la siembra de cultivos para otros fines haya cobrado especial relevancia. Los cultivos empiezan a ser sembrados con objetivos variados que en general se pueden asociar a un servicio ecosistémico deteriorado, como ser: i) la protección contra la erosión (cultivos de cobertura); ii) la incorporación de materia orgánica (abonos verdes); iii) la retención de nutrientes (cultivos trampa); iv) la incorporación de N vía fijación atmosférica (con leguminosas); v) la descompactación del suelo; vi) el consumo de

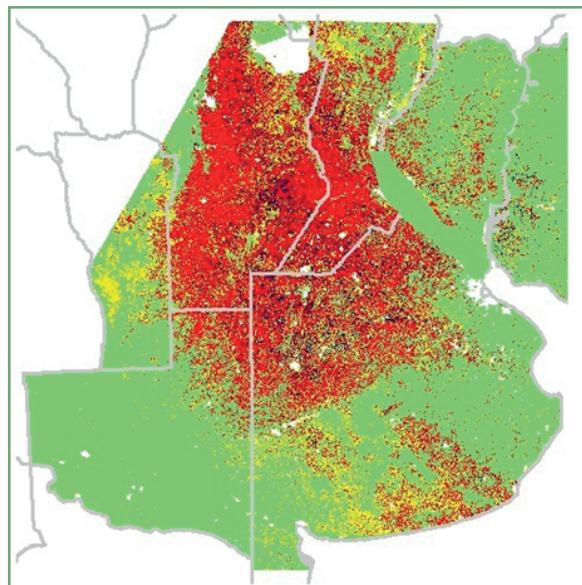


Figura 4. Mapa de la región agrícola Pampeana, mostrando las áreas con un solo cultivo al año en verano (rojas), un solo cultivo al año en invierno (amarillo) y doble cultivo (azul) (promedio años 2000-2009).

agua para disminuir las napas; vii) la cobertura del suelo para reducir la evaporación; viii) la reducción de malezas por competencia; y ix) hasta la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (Piñeiro et al., 2014). Las funciones son muchas y diversas, pero apuntan a proveer uno o varios servicios ecosistémicos de interés. Por ello proponemos nombrar a éstos “cultivos de servicio” e incorporarlos al marco teórico de los servicios ecosistémicos, cambiando el paradigma de la revolución verde centrado en el cultivo, a un nuevo paradigma agrícola centrado en el ecosistema y sus servicios (Figura 6). La clave del éxito de los cultivos de servicios será la utilización de la energía no interceptada por los cultivos de cosecha para canalizarla hacia nuevos servicios ecosistémicos distintos al de provisión de alimentos (Piñeiro et al., 2014). Este nuevo paradigma exige nuevas líneas de investigación agronómica, con fuertes bases en

ecología de ecosistemas, por ejemplo en el manejo y desarrollo de especies (y mezclas de especies) para mejorar la producción de raíces, el consumo y eficiencia en el uso del agua, la fijación biológica de N, la habilidad competitiva y la captación de nutrientes.

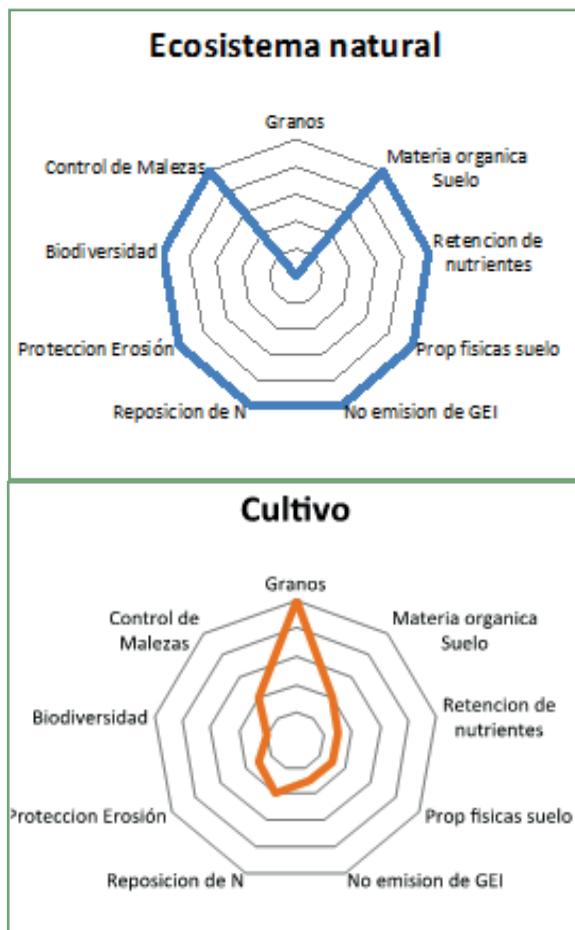


Figura 5. Diagramas teóricos mostrando la provisión relativa de distintos servicios ecosistémicos en ecosistemas naturales y sistemas cultivados (Piñeiro et al., 2014).



Figura 6. Diagrama teórico mostrando la provisión relativa de distintos servicios ecosistémicos de distintos cultivos de servicios, y una rotación compuesta de varios cultivos de servicios con cultivos de cosecha (Piñeiro et al., 2014).

Bibliografía

Alvarez, R. 2001. Estimation of carbon losses by cultivation from soils of the Argentine Pampa using the Century Model. *Soil Use and Management*, 17(2), pp.62–66. Available at: <Go to ISI>://WOS:000169504700002.

Berhongaray, G., R. Álvarez, J. De Paepe, C. Caride, y R. Cantet. 2013. Land use effects on soil carbon in the Argentine Pampas. *Geoderma* 192:97–110.

Cambardella, C.A., y E.T. Elliott. 1993. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. *geoderma*, 56, pp.449–457.

Caviglia, O.P., y F.H. Andrade. 2010. Sustainable Intensification of Agriculture in the Argentinean Pampas : Capture and Use Efficiency of Environmental Resources. *Annual Review of Environment and Resources*, (Iso 1997).

Cerri C., C. Feller, J. Balesdent, R. Victoria, y A. Ple-necassagne. 1985. Application du traçage isotopique naturel en ^{13}C à l'étude de la dynamique de la matière organique dans les sols . C. R. Acad. Sc. Paris, 300, série II, 9, 423–428.

Glover, B.J.D., C.M. Cox, y J.P. Reganold. 2007. A Return to Roots? *Scientific American*, (August 2007), pp.82–89.

Guo, L.B., y R.M. Gifford. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, 8(4), pp.345–360. Available at: <http://www.blackwell-synergy.com/doi/abs/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>.

Kell, D.B. 2011. Breeding crop plants with deep roots: their role in sustainable carbon, nutrient and water sequestration. *Annals of Botany*, 108(3), pp.407–18. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pub-med/21813565> [Accessed August 23, 2011].

Mazzilli, S.R. 2015. Dinámica del carbono en sistemas agrícolas bajo siembra directa: nuevas evidencias obtenidas mediante el uso de ^{13}C sobre la importancia de las raíces, la calidad de los residuos y el laboreo. Escuela para Graduados, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.

Mazzilli, S.R., A.R. Kemanian, O.R. Ernst, R.B. Jackson, y G. Piñeiro. 2015. Grater humification of below-ground than aboveground biomass carbon into particulate soil organic matter in no-till corn and soybean crops. *Soil Biology and Biochemistry*, en prensa.

Mazzilli, S.R., A.R. Kemanian, O.R. Ernst, R.B. Jackson, y G. Piñeiro. 2014. Priming of soil organic carbon decomposition induced by corn compared to soybean crops. *Soil Biology and Biochemistry*, 75, pp.273–281. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038071714001254> [Accessed July 18, 2014].

Odum, E.P. 2007. The Strategy of Ecosystem Development The Strategy of Ecosystem Development An understanding of ecological succession provides a basis for resolving man ' s conflict with nature . , 164(3877), pp.262–270.

Piñeiro, G; Pinto, P; Arana, S; Sawchik, J.; Díaz, J.I.; Gutiérrez F. y Zarza, R. 2014. Cultivos de Servicio: integrando la ecología con la producción agrícola. XXVI Reunión Argentina de Ecología. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Chubut, Argentina. 02-05 de noviembre de 2014.

Rositano, F., y D.O. Ferraro. 2013. Ecosystem Services Provided by Agroecosystems: A Qualitative and Quantitative Assessment of this Relationship in the Pampa Region, Argentina. *Environmental Management*. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pub-med/24323383> [Accessed February 24, 2014].

[volver al índice](#)

Reflexiones acerca de la agricultura, y los planes de uso y manejo de suelos en Uruguay

Hoffman Esteban, Fassana Nicolás, Silva Horacio, Baeten Andrés, Ferreira Gonzalo

Departamento Técnico - Unicampo Uruguay SRL

Bvd. Artigas 1011 - Local 4, 60000 – Paysandú, Uruguay

Correo electrónico hoffman@unicampo.com.uy

Introducción

Con motivo del III Simposio Nacional de Agricultura desarrollado en Uruguay en setiembre del 2013 —organizado por la Facultad de Agronomía – UdelaR e IPNI Cono Sur—, Hill y Clérico (2013), con la responsabilidad del plan de manejo y uso de suelos a cuestras, ya vigente en Uruguay, escribían: “por primera vez en la historia del país, existe una política pública definida, de carácter obligatorio que pretende, regular el uso de suelo en función de su capacidad”. El primer partido, toda una prueba de fuego, se inició con la zafra de cultivos de invierno 2013 y se le sumaron las zafras, verano 2013-14, invierno 2014, y verano 2014-15. La situación actual del sistema agrícola uruguayo, que no laborea, ni rota con pasturas, en el que domina la soja, cada vez más sola, y desarrollada mayormente por empresas que usan el suelo bajo régimen de arrendamiento, ve incrementado los riesgos de erosión del suelo y, por tanto, regular el uso de suelo en este sentido, parece más que una política lógica y necesaria. Más aun si consideramos las características edáficas, topográficas y climáticas de Uruguay, un país pequeño que ya ha ocupado mayormente toda el área de suelos con mejor aptitud agrícola (Hoffman et al., 2013; Molfino, 2013). No es el motivo de este artículo, pero claramente hay un equipo y un director de la orquesta al que hay que reconocerle esta nueva situación que distingue a Uruguay.

El plan y las reglas de juego

La ley actual de suelos (No 18564), en la cual se enmarca el vigente plan de manejo y uso de suelos, una modificación de la ley votada en 1981 (No 15239), modificada en el 2009, en lo sustancial establece que el Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (MGAP) es el responsable de definir las normas técnicas para el cuidado del suelo y fiscalizar su cumplimiento (Hill y Clérico,

2014). El artículo 5 de esta ley (decreto 405/2008), establece que el Ministerio Ganadería Agricultura y Pesca (MGAP) exigirá un plan de manejo y uso responsable del suelo, teniendo en cuenta: los suelos del predio, las prácticas de manejo, la secuencia de cultivos y la erosión tolerable.

Hoy estamos en plena etapa de implementación, seguimiento y evaluación del plan instrumentado por parte el MGAP, y para las empresas e ingenieros agrónomos acreditados (cada plan debe ser realizado y firmado por un Ing. Agr., acreditado a tales efectos, y que figura como responsable técnico del plan), es un hecho consumado. A la fecha, para quienes quieran destinar y usar el suelo bajo agricultura, deben elaborar un plan de manejo y uso de suelos, y luego de ser presentado al MGAP (en momentos específicos y generales para todos), se recibe la comunicación de aprobación del plan (al agricultor y al dueño de campo, en caso de que sean personas físicas o jurídicas diferentes). Frente a un plan que no califica, por no cumplir con las exigencias vigentes, existen más de una opción de intercambio y trabajo con los técnicos de MGAP, así como plazos razonables para su replanteo y presentación de nueva formulación.

Elaboración y presentación del plan de manejo de suelos

Para confeccionar un plan de uso y manejo de suelos, es necesario identificar y agrupar los tipos de suelos según su capacidad de uso (**Figura 1**). A partir de la cartografía disponible en Uruguay (cartas de suelos, grupos de productividad - CONEAT, carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (1:1 000 000), mapa altimétrico, aptitud de uso general, y cartografía de pendientes), y fotos aéreas, se delimitan las zonas potencialmente cultivables y sobre ella se elaboran unidades de foto interpretación (UFI's). En base a estas, se definen los sitios para el relevamiento a campo de las principales características del suelo (des-

cripción del perfil de horizontes, profundidad total, textura, etc.) y del paisaje (tipo de relieve, grado y longitud de pendientes, desagües naturales, cárcavas, etc.).

Con esta información se procede a la elaboración de las clases de capacidad de uso (CUS) presentes en el área de estudio en base a Klingebiel y Montgomery (1961), y posteriormente se realiza el mapeo a escala predial. Recién entonces, se plantean diferentes rotaciones para estimar las pérdidas de suelo por erosión en base a la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (**Figura 2**), desarrollada por el USDA en Estados Unidos, estudiada y validada en Uruguay (USLE/RUSLE, Clérico y García Préchac, 2001), cuya versión del modelo actual es el EROSION 6.0 Rel-1.0.8). Finalmente, los resultados son contrastados con los niveles de tolerancia de pérdida del tipo de suelo involucrado. El proceso de estimación de pérdida y evaluación de alternativas, prosigue hasta que la rotación logre niveles de pérdidas iguales o menores a la tolerancia de referencia.

A la fecha, la recepción de planes utilizado por el MGAP-RENARE, se realiza en una plataforma web en la cual los técnicos acreditados y registrados ingresan la información requerida y/o modifican la ya presentada en los períodos establecidos a tal efecto. La presentación de un plan consiste en: (i) cargar uno o más polígonos, delimitando

el área en que operará dicho plan, (ii) el archivo de la corrida del modelo de erosión final (que contiene las características de la clase de uso en cuestión, suelos involucrados y manejo asociado al sistema productivo), (iii) la secuencia de cultivos propuesta, y (iv) datos del propietario y tenedor del padrón.

Algunos resultados globales del plan de manejo y uso de suelos

Hill y Clérico (2014), en el Congreso Uruguayo de Suelo – VI Jornada de la SUCS–, presentaban los primeros grandes resultados después de finalizada la primera ronda de presentación obligatoria de planes, en invierno 2013 y verano 2013-14. En base a las cifras de referencia global tomadas por RENARE (la Dirección General de Recursos Naturales Renovables del MGAP), como esperables en cuanto al área física bajo agricultura (1.500.000 ha físicas), los planes presentados habrían alcanzado un 94% de este valor (**Tabla 1**). En base a los resultados publicadas por DIEA (2014), los planes presentados habrían alcanzado el 89% del área sembrada con cultivos de invierno en el 2013 y del 93% para el área finalmente sembrada con cultivos de verano 2013-14.

A priori, un nivel de cumplimiento muy elevado si pensamos en todo lo que esto significa para el Uruguay. El faltante, inclusive, podría ser el resultado de que el área de referencia inicial tomada

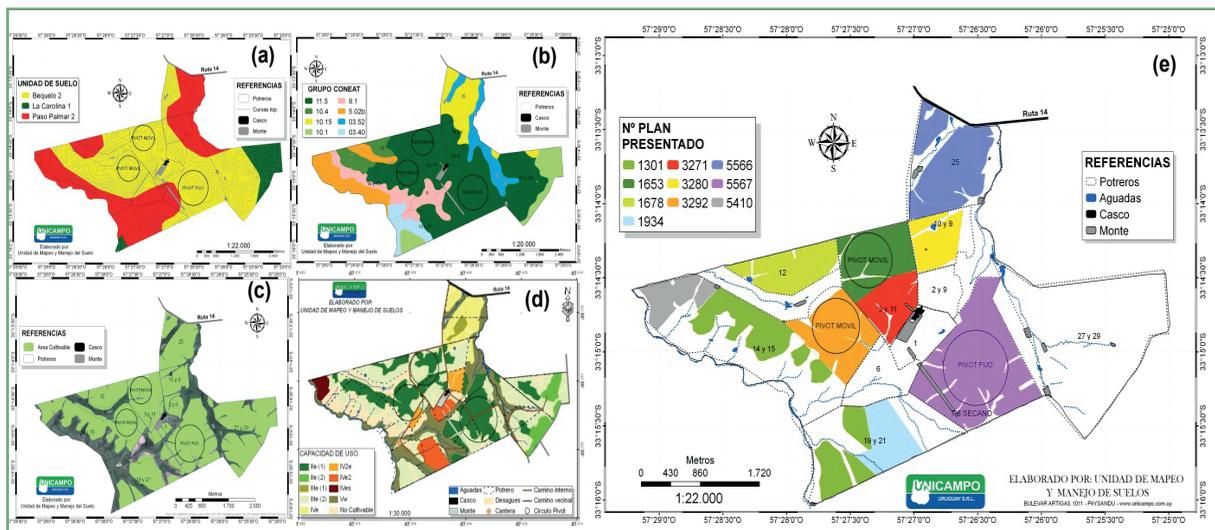


Figura 1. Ejemplo del trabajo de mapeo para un predio ubicado en Soriano, en suelo con alta aptitud agrícola que rota con pasturas. Unidades de suelo (a), grupo de suelo CONEAT (b), delimitación del área cultivable-no cultivable (c), clase de capacidad de uso y sub-classes de riesgo de erosión, sequía y anegamiento (d) y polígonos de planes presentados al 2013-14 (e). Nota: los polígonos sin planes, se encuentran en fase de pasturas y por tanto no es obligatoria su presentación a la fecha.

por el MGAP sea inexacta, o explicado, en parte, por el área que esta por debajo de la superficie mínima exigida (ver plan de uso de suelo en <http://www.cebra.com.uy/renare/>). Para la zafra 2013-14, tomando como referencia la distribución del área por estratos de tamaño publicada por DIEA (2014), se puede estimar que un 63% de esta diferencia (de 6% del área incumplida), estaría dentro de esta categoría (área no obligatoria).

En Uruguay, desde principios del siglo XXI, dejamos de contar con estadísticas precisas relacionadas con la productividad y el área de siembra de los distintos cultivos, tanto a nivel nacional como regional (Hoffman et al., 2013). La distribución de los planes de siembra en la zafra 2013-14, nos permite nuevamente volver a mirar hacia dónde se ha expandido el área agrícola, y conocer cuál es la proporción actual de área bajo agricultura en la región tradicionalmente agrícola del litoral oeste (RLA) y en lo que podríamos considerar como nueva región agrícola (NRA) (Tabla 1).

El área agrícola se concentraba en la RLA a principios de siglo (90% del área cosechada), y en total era menos de un tercio del área física actual (DIEA, 2000). Desde entonces, el área física bajo agricultura superó el 1.5 millones de hectáreas

bajo agricultura y más de 2 millones de hectáreas cosechadas anualmente. La expansión agrícola corrió la frontera agrícola desde la RLA, y si bien aún sigue siendo la región con mayor área destinada a la agricultura, más de un 40% del total (un área que duplica a toda el área bajo agricultura a fines del siglo XX), hoy está ubicada fuera del área agrícola tradicional, en la NRA (Tabla 1). La relación de la posición geográfica del área es de 58-42% para la RLA y NRA, respectivamente. Esta relación en la zafra 2013-14, difiere de la relevada en el último Censo General Agropecuario, realizado en el 2010-11 (DIEA, 2011) (52-48%, para la RLA y NRA, respectivamente). Estas diferencias podrían ser atribuidas a una reconcentración del área en la RLA hacia la región de suelos con mayor aptitud agrícola (Molfino, 2013), o a que parte de los omisos se ubican mayormente en la NRA.

La agricultura en los próximos años, en base a los planes inscriptos en el 2013-14

La información suministrada por el RENARE - MGAP (a solicitud de los autores para la elaboración de este trabajo), nos permite, como nunca antes, mirar el escenario futuro de corto plazo, en base a la planificación realizada en el 2013-14 (Figura 3). En el contexto de precios aún elevados de la soja y los cereales (sobre todo de invierno) cuando se completaba la inscripción del total de planes en el 2013-14, el escenario proyectado para los próximos años es el que se presenta en la Figura 3.

Después de una fuerte expansión de la agricultura uruguaya, que duro más de 10 años, en base a los planes de suelos inscriptos en el 2013-14, el área física bajo agricultura evidencia una leve baja (Figura 3a). No es posible asegurar que sea el resultado directo de las exigencias derivadas de la presentación de los planes de manejo y uso de suelos, cambios en la rotación y componentes de la secuencia agrícola, en la medida que en

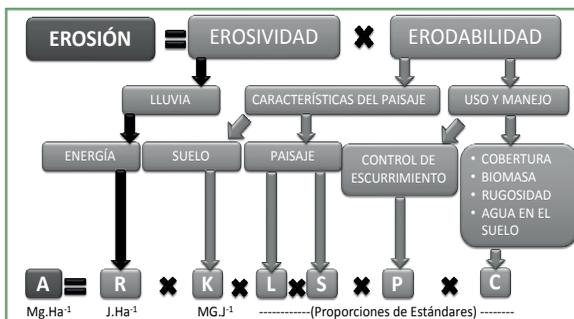


Figura 2. Componentes de la ecuación universal de pérdida de suelos (validada en Uruguay) USLE/RUSLE (Cléricsi y García Préchac, 2001). Modelo operativo: versión EROSION 6.0 Rel-1.0.8.

Tabla 1. Número y área de planes presentados en la zafra 2013-14, por gran región y para el total del país. Fuente: en base a datos suministrado por RENARE- MGAP.

Macro Región	Planes	Superficie		
	Número	Proporción (%)	Área (ha)	Proporción (%)
Región Litoral Agrícola (RLA) (*)	7842	60	890.199	58.3
Nueva Región Agrícola (NRA) (**)	5318	40	637.161	41.7
Total País	13160	100	1.527.360	100.0

*.- Departamentos de Paysandú, Río Negro, Soriano y Colonia. **.- Resto del país.

menos de 18 meses, las condiciones del negocio también presionan a la baja agrícola. Además del evidente surgimiento en el invierno de los cultivos protectores, parte del área física bajo agricultura continua, pasaría a rotar con pasturas, y junto con las gramíneas C4, serían en proporción tres veces más en relación al área cultivada con soja (Figura 3d). A la fecha, sin información disponible a nivel departamental, no es posible completar el análisis de cuál es el sesgo por regiones, que seguramente existe.

Si comparamos el cambio en algunos indicadores de uso del suelo previsto, como consecuencia de los planes de manejo y uso de suelos, con la composición y uso del suelo previo al funcionamiento del plan (verano 2012-13) (IA menor a 1.4,

menos de 5% de pasturas en el área agrícola, 86% soja y 14% gramíneas C4, según DIEA, 2013), el cambio es más que significativo. No solo se esperaría un incremento más que importante en el área sembrada con pasturas y gramíneas C4, sino que la proporción de suelo descubierto bajaría drásticamente y pasaría a estar ocupado por una superficie de cultivos protectores significativa (Figura 3). Sin que sea necesario estimar la magnitud de la erosión media antes del inicio de plan y cuál será su reducción en el corto plazo, casi no hay dudas de que va a ser significativa, de cumplirse lo proyectado.

¿Será esto lo que finalmente ocurrirá, cuando a la fecha, se hace evidente el deterioro de los resultados económicos, consecuencia del incre-

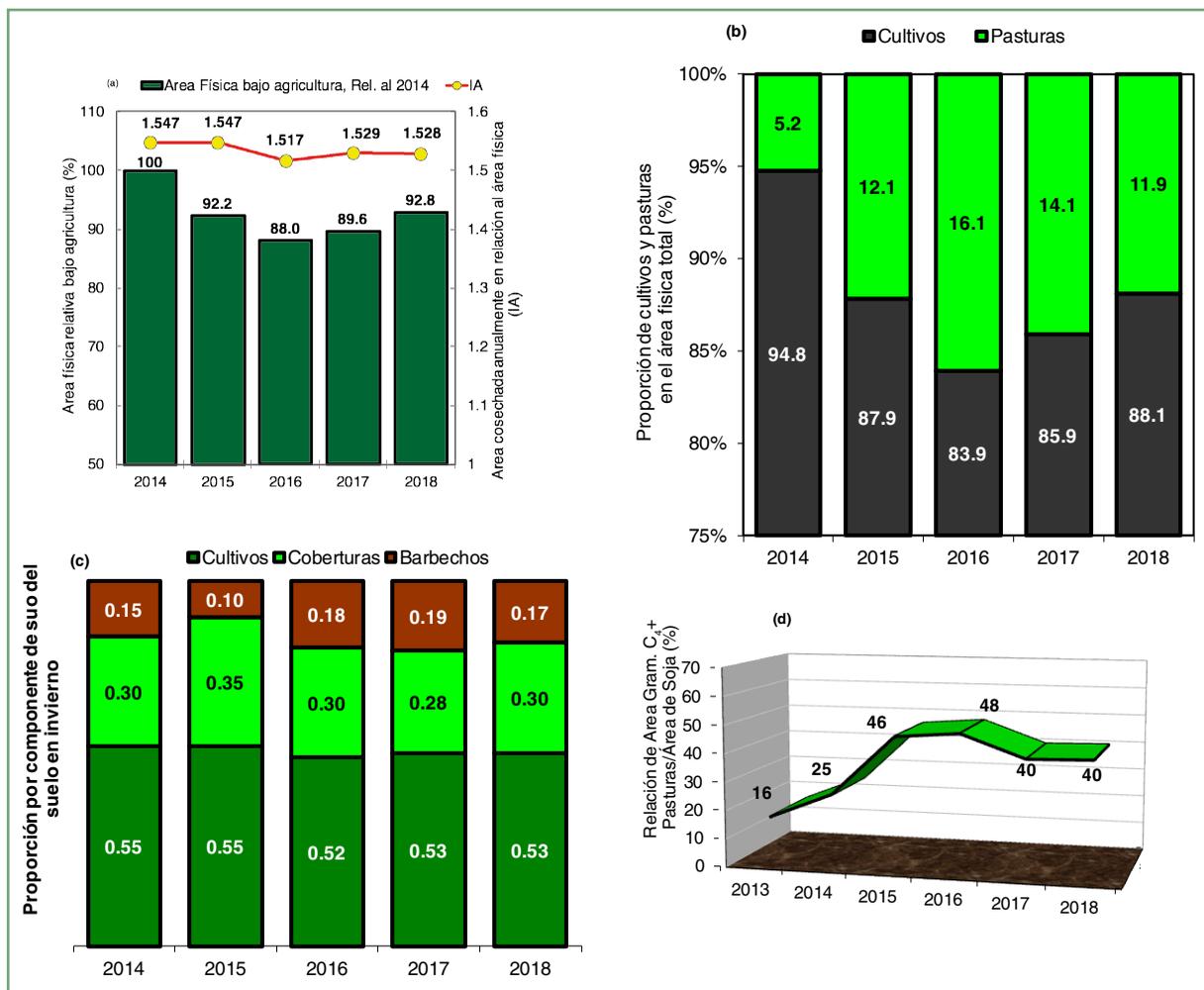


Figura 3. Evolución prevista de los componentes de la rotación y secuencia de cultivos hasta el 2018, en base a todos los planes inscriptos en el 2013-14. Área física bajo agricultura e intensidad agrícola (a); proporción de cultivos y pasturas en rotación (b); composición de uso del suelo en el invierno (c); y relación gramíneas C4+pasturas en relación al área de soja (d).

mento de los costos de producción, menor productividad (resultado del clima) y fuerte reducción de los precios de los granos? Ya existe una fuerte presión al cambio (DIEA, 2014), y sin dudas este va a ser uno de los grandes desafíos del plan de manejo y uso de suelos.

El nuevo componente en el sistema agrícola uruguayo

Después de haberse iniciado el fenómeno soja a inicios del año 2000, el trigo, cuya área ya era baja y seguía disminuyendo lentamente, en consonancia con la soja (y por necesidad de la soja), se expande con ella por todo el territorio nacional. Con un crecimiento desfasado en el tiempo, el trigo multiplica casi por 4 su área en 8 años (Figura 4). A pesar de este crecimiento del área de trigo, el de soja es netamente superior, conduciendo a que la relación de área sembrada de soja-trigo, crezca sin parar, más aun en los últimos 3 años, como resultado de que se estanca y decrece el área sembrada de trigo (Figura 4).

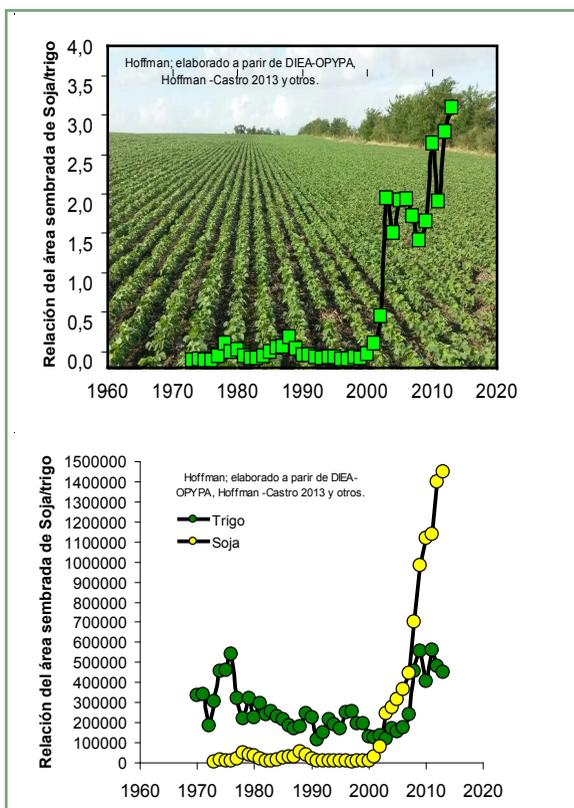


Figura 4. Evolución de la relación del área sembrada de soja/trigo (a) y el área sembrada de soja y trigo (b), en los últimos 42 años en Uruguay. Elaborado en base a DIEA, 2013; Hoffman et al., 2013.

Como el resto de los cultivos (gramíneas C4 en el verano y canola en el invierno), no acompañan al aumento del área de la soja, esta se va quedando cada vez más sola, y por tanto existe una fuerte tendencia a que crezcan los barbechos descubiertos en el invierno, más allá de que existen empresas y productores que desde mucho antes ya habían comenzado a preocuparse y ocuparse de este problema. Entre quienes comenzaron con la siembra de cultivos protectores en el invierno, o con mayor proporción de gramíneas C4 rotando con la soja y el trigo, es probable que exista un gran consenso, en cuanto a que sin el plan obligatorio de suelos seguramente estaríamos frente a un área muy importante de suelos descubiertos en el invierno.

Desde que se inició el programa piloto del plan y manejo de uso de suelos en el 2010, hasta que pasó a ser el plan obligatorio, como resultado de la actividad de divulgación y exigencias del futuro plan de suelos por parte del MGAP- RENARE, así como la generación y difusión por parte de la Facultad de Agronomía e INIA en distintas jornadas, seminarios y congresos, surgía evidencia clara acerca de la conveniencia de cubrir los suelos, sobre todo los rastrojos de soja que no fuesen destinados a la siembra con cultivos de invierno (Figura 5). En el primer año del plan (año 2013), ya se registra un 22.4% del área agrícola sembrada en el invierno con cultivos protectores, en relación a un 44% con cultivos de invierno, 21.2% en barbechos, y el resto con verdeos, pasturas perennes y otros de uso desconocido (DIEA, 2013). Para el invierno 2014, la encuesta realizada por DIEA (2014), arroja un uso de los rastrojos de verano 2013-14 (en el invierno 2014), de 32% sembrado con cultivos de invierno, 24.5% en barbechos y el

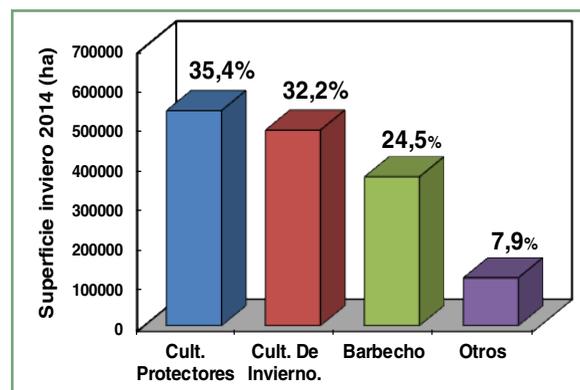


Figura 5. Área y proporción del total de área agrícola, sembrada con cultivos protectores, cultivos de invierno, barbechos y otros (DIEA, 2014).

área con cultivos protectores asciende al 35.4%. Esto lleva a que después de la soja, el segundo componente en importancia pasa a ser el de los cultivos protectores, sembrados mayormente con avena.

Considerando lo atípica de la composición de uso del suelo, a priori beneficiosa en cuanto a no dejar barbechos descubiertos provenientes de los cultivos de soja, también podemos pensar en las dificultades en cuanto a que una porción cada vez mayor del área no se destina a la producción de grano, y por tanto se transforma en un sobre costo para el resto de los componentes de la secuencia. En base a las perspectivas actuales, es probable que se profundice más aún la diferencia entre el área destinada a cosecha y a los cultivos protectores en el invierno. Como fue dicho anteriormente, el resto de los cultivos de sistema no acompañan y, de no estar el plan de suelos vigente, tendería a estar sola la soja y una gran mayoría de los rastrojos de soja a pasar descubiertos el invierno, como ocurría antes del 2011. En el invierno 2014, la mayor proporción de los rastrojos del verano de soja 2013-14, estuvieron cubiertos por cultivos de invierno para grano o cultivos protectores (Figura 6).

Si bien el 16% y 23% de los rastrojos de soja de 1° y 2°, respectivamente pasaron el invierno descubiertos (cifra sustancial si consideramos la importancia de la soja en el sistema), parte seguramente se dé en ambientes de bajo riesgo de erosión, en donde, aun con suelo descubierto las pérdidas de suelos, se ubican por debajo de la tolerancia. La distribución de la siembra de los cultivos protectores, muestra que existe una racionalidad asociada a la necesidad de proteger

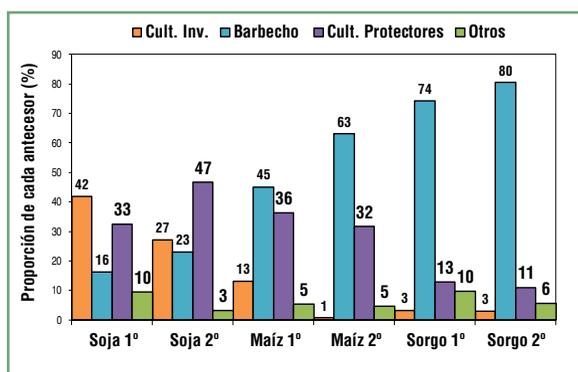


Figura 6. Proporción del total de área sembrada con cultivos protectores, cultivos de invierno, barbechos y otros, según cultivo de verano 2013-14 (DIEA, 2014).

el suelo sobre los antecesores con mayor riesgo de erosión en el invierno (Figura 6).

Si los cultivos de cobertura son de elevada productividad y logran elevados niveles de cobertura del suelo, serán efectivos en cuanto a reducir las pérdidas de suelo por erosión, mientras que el rastrojo de verano previo no lo logra por sí solo. En este sentido, en la Figura 7, se presentan resultados de pérdidas de suelo, estimadas a través de la USLE/RUSLE - versión 6.0, como resultado de la incorporación de cultivos de cobertura de elevada productividad, para los cuales se puede manejar un 80% de cobertura de suelo a la siembra del próximo cultivo de verano.

En ambientes de esta región del país (litoral centro), para pendientes largas cuando el gradiente de la pendiente supera el 4%, aun con la implementación de una rotación de cultivos con

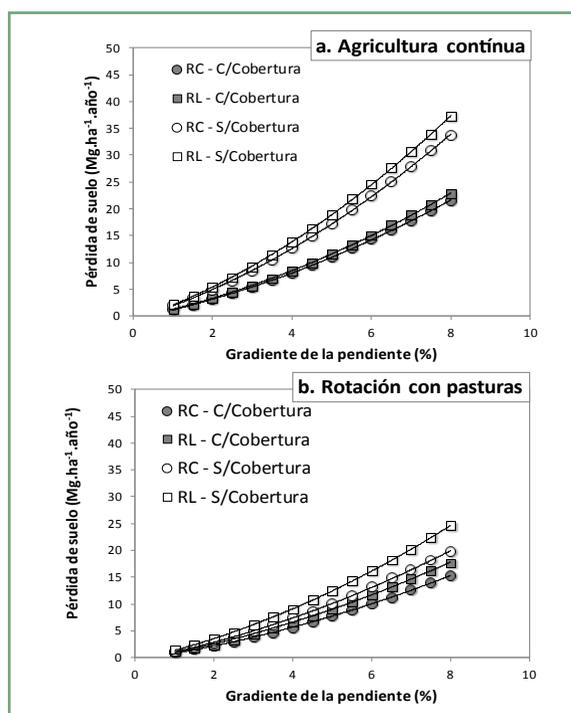


Figura 7. Pérdidas de suelos por erosión, estimadas por la USLE/RUSLE (versión 6.0), según gradiente de la pendiente, para dos sistemas agrícolas. Agricultura continua sin pasturas (a), y agricultura en rotación con pasturas (b), para un brunosol éútrico típico sobre unidad Young, ubicado en la localidad de Paysandú, para una longitud de pendiente media de 350 metros. (Nivel de tolerancia de referencia – 7 Mg.ha⁻¹). Nota: RC – Rotación corta (3 años), RL – Rotación larga (6 años). El gráfico b considera 3 años de pastura en cada situación.

pasturas y la inclusión de cultivos protectores de elevada productividad, las pérdidas de suelos superarían al nivel de tolerancia, sin la inclusión de terrazas. A pesar de ello, se puede observar claramente el impacto de rotar con pasturas y/o incluir cultivos de cobertura (Figura 7). En un sistema que no rote con pasturas, existen pocas opciones de mantener las pérdidas de suelo por debajo del nivel de tolerancia si no se incluyen este tipo de componentes, y claramente en los sistemas que no roten con pasturas perennes es donde se genera la mayor diferencia. En la medida que el área con menos de 2% de pendiente es muy baja en esta zona (como será discutido en la siguiente sección), sin coberturas no es posible pensar en agricultura continua en aquellas áreas que aceptan agricultura continua sin pasturas.

La existencia de registros de siembra de cultivos protectores, puede decirnos poco, más allá de lo relevante de la importancia en área de este componente, si no contamos con información en cuanto a su probable funcionalidad (capacidad real de cubrir el suelo y mantenerlo protegido una vez iniciado el barbecho para la siembra del próximo componente). Aunque no existen registros publicados de los cultivos protectores sembrados en el país acerca de la biomasa acumulada y de la cobertura de suelo a la siembra del próximo componente, dadas las condiciones en que se

realiza —fechas de siembra más tardías (en la medida que parte de las coberturas, van después de la siembra de los cultivos para grano), en chacras de baja capacidad de aporte de nutrientes y sin fertilización—, es poco probable (sobre todo en inviernos lluviosos), que se logren los niveles requeridos de crecimiento, para que estos cultivos protectores cumplan con su función. La presión actual del sistema, derivada de su baja rentabilidad y escasa liquidez, puede conspirar más aún, para que esta situación se revierta, incluso se cumplan los planes en cuanto a cubrir el suelo si baja el área sembrada con cultivos de invierno para grano. Pasar a una etapa de control, acerca de la real cobertura de suelo de los cultivos protectores, además de que se cumpla su siembra, sin dudas deberá ser especialmente considerado por el MGAP- RENARE.

Necesidad de cambios en la rotación en zonas con elevado riesgo de erosión

Las implicancias e impactos concretos de la aplicación del plan de manejo y uso de suelos,

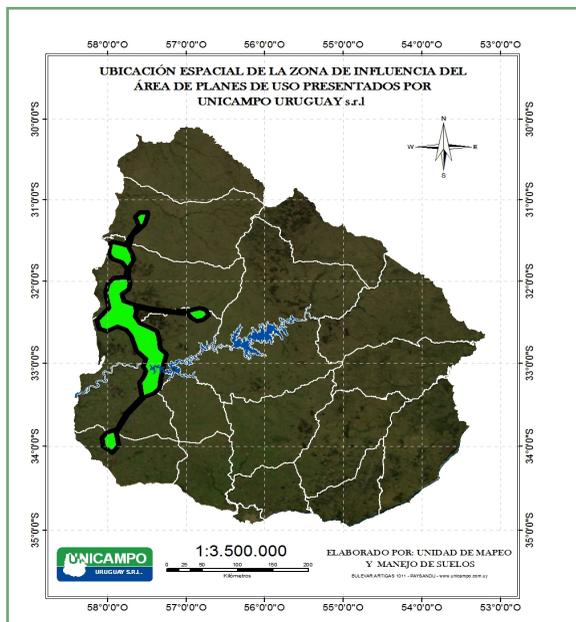


Figura 8. Ubicación espacial de la zona de influencia del área de planes de uso y manejo presentados por Unicampo Uruguay en el 2013-14.

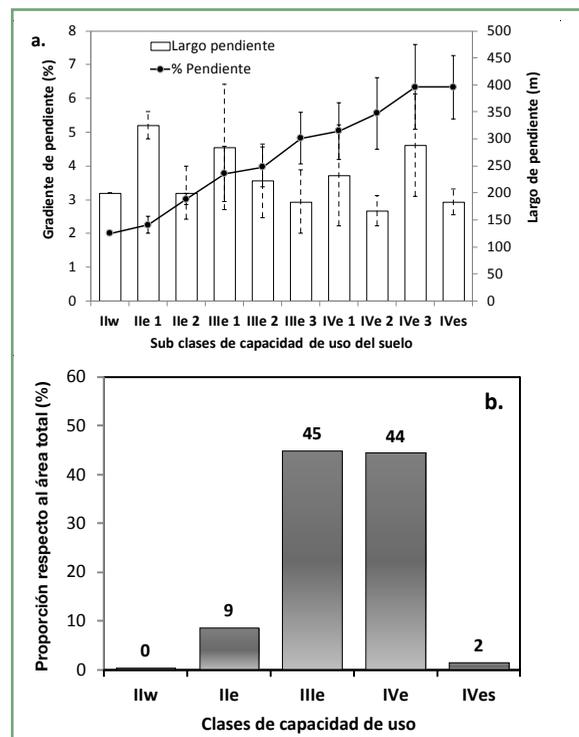


Figura 9. Evaluación de los principales resultados de 195 planes ubicados en la RLA (a) relación entre las CUS, largo y gradiente de la pendiente, y (b) proporción de clases. Planes de los clientes de Unicampo Uruguay, presentados en el 2013-14.

desde el invierno 2013, se pueden evaluar en los resultados que surgen del procesamiento de una base de datos de casi 200 planes presentados, ubicados en una región con características particulares, situada en la RLA, en los departamentos de Paysandú y Río Negro (Figura 8).

En la zona geo-referenciada de estos planes, dominan las clases de uso restrictivas en cuanto al potencial de pérdidas de suelo por erosión (CUS III y IV) (Figura 9b), derivadas fundamentalmente de las fuertes pendientes de la región (Figura 9a). En más del 70% de los planes presentados, dominan situaciones en las cuales la pendiente es superior al 3% de pendiente (datos no mostrados), lo que a priori limita las posibilidades de instrumentación de sistemas de agricultura continua, aun con el uso de cultivos protectores (Figura 7a).

Los empresarios y productores ubicados en esta zona, ya venían incorporando cultivos protectores, y rotando con pasturas perennes desde antes de que fuese obligatorio el plan de suelos. Es por ello que el 90% de los planes presentados (86% del área involucrada), contaron con pasturas en la rotación (Figuras 10 y 11).

De no existir la intención de estos productores de incorporar pasturas, igualmente se mantendría

una participación importante de las pasturas en los planes, y no podría ser muy elevada la proporción de agricultura continua (38% de los planes y 41% del área), antes de considerar el planteo de terrazas. Para los planes que obligatoriamente debieron ir con pasturas (62% del total), 34% precisaron terrazas para que las pérdidas de suelos estimadas se lograsen ubicar por debajo del nivel de tolerancia (datos no mostrados).

Si pensamos que existen regiones del país, con mayores restricciones, y por tanto mayor riesgo de erosión (asociadas a la topografía y tipo de suelos), era esperable que la obligatoriedad del plan de suelos, llevara implícita la aparición de las pasturas en la rotación, además de los cultivos protectores. En una proporción inestimada, realizar terrazas, incrementaría la proporción del área que aun sin pasturas perennes podría conducirse bajo agricultura continua. En algunos casos los elevados costos de construcción y mantenimiento (sobre todo cuando las terrazas se deben ubicar a pocos metros las unas de las otras), sumada a la reducción del área efectiva de siembra, se transformaría en una limitante de peso para su instrumentación, considerando la situación económica y tenencia de la tierra.

En el escenario actual, con altos costos de producción y de la tierra, y la caída en los precios de

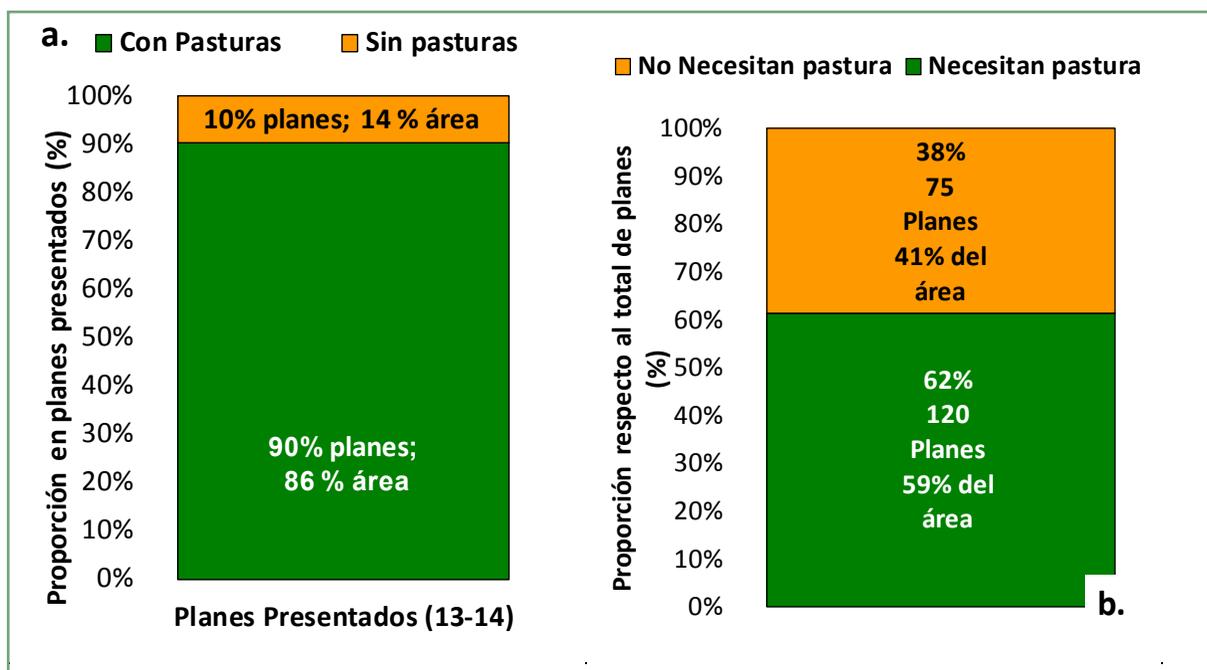


Figura 10. Proporción del total de planes presentados que contienen pasturas perennes en la rotación (a), y que podrían haber sido planteados con agricultura continua de no existir la intención de los productores de incorporar pasturas (b). Clientes de Unicampo Uruguay, zafra 2013-14.

los granos, así como la gran proporción del área bajo arrendamiento (DIEA, 2014) (en general de corto plazo), sumarían presión de incumplimiento, en la medida que tanto pasturas perennes, como terrazas requieren tiempo para ser amortizados o la inversión recuperada con efectos residuales favorables. En la medida que los precios presionen al negocio agrícola como en la actualidad y el cambio de escenario se extienda en el tiempo, ya sea por el lado del recambio de quien realice la agricultura o por el lado del incumplimiento del plan presentado, sumarán tendencia al incumplimiento.

El desafío de la fiscalización y seguimiento de la marcha del plan

El MGAP-RENARE, desde la culminación de la primera etapa de presentación completa de los planes en el 2013-14, se abocó en primer lugar a la identificación y convocatoria de casos omisos. En una segunda etapa, sin abandonar la anterior, comienza el tiempo de revisión técnica de los planes, identificación y convocatoria de los técnicos responsables para ajustes en los casos en que fueron comprobadas irregularidades o desajustes en aspectos técnicos del plan, con el objetivo de que las observaciones fueran levantadas en tiempo y forma. Una tercer etapa ejecutada en la últi-

ma zafra, junto a las anteriores, fue la fiscalización del cumplimiento de la rotación planificada en los planes presentados. Además de estas instancias de evaluación y fiscalización, permanentemente existe comunicación por parte de los técnicos de RENARE de observaciones puntuales al plan, las cuales deben ser levantadas en cada etapa prevista a tal fin. Esta información, surge de la propia interacción y trabajo con los técnicos regionales del MGAP, sin que se conozcan estadísticas de identificación de omisos, incumplimiento, reformulación o cambio de planes.

Si consideramos la tendencia al desvío de lo planificado en el 2013-14, con evidencias de cambios como consecuencia de la situación por la que pasa la agricultura actual (analizada anteriormente), seguramente, para que se salvaguarde y se logre el objetivo principal, en cuanto a mantener controlados los niveles de pérdidas de suelo por erosión, el trabajo por parte de los responsables institucionales del plan se deberá redoblar; pero, sin dudas, precisa del apoyo de todos los técnicos acreditados y con planes bajo su responsabilidad. Es por ello, que no hay otro camino que el verdadero trabajo conjunto, y no solo el de la fiscalización.

En este sentido, si se compara lo proyectado para el corto plazo, en base a los planes del 2013-14, con los resultados publicados por DIEA

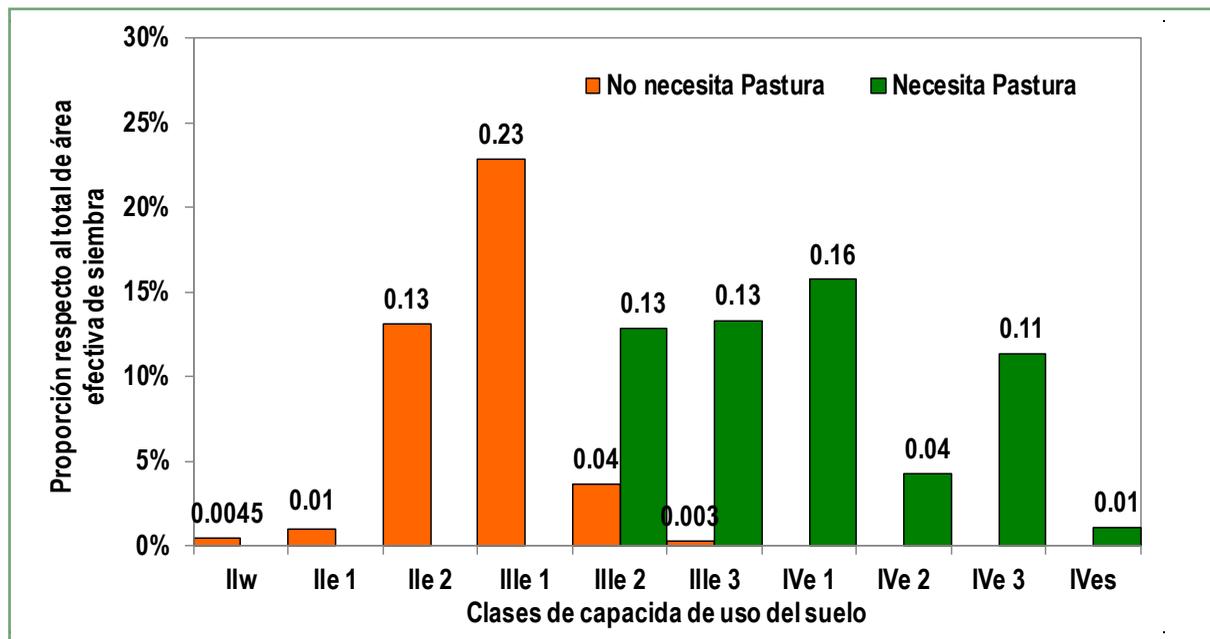


Figura 11. Proporción del total de planes presentados en función de la CUS dominante. Clientes de Unicampo Uruguay, zafra 2013-14.

(2014), y la probable fuerte disminución del área de siembra con cultivos de invierno en el 2015, ya existen desvíos significativos del plan original (Tabla 2).

La fuerte reducción de los cultivos de invierno observada en el 2014, y probable para el 2015, en relación a la intención planificada en el 2013, no solo es de una magnitud imposible de haber sido pronosticada en el 2013, sino que no ha sido acompañada por rastros de gramíneas C4 o la magnitud del incremento en los cultivos protectores. Las condiciones de exceso de precipitaciones en el invierno 2014, si bien limitó las posibilidades de siembra en fecha de este nuevo componente en general, seguramente también fue la excusa para muchos casos particulares. En este sentido el MGAP- RENARE, igualmente consideró de recibo a muchos casos, en que existió denuncia de la imposibilidad de siembra de un cultivo protector, por condiciones climáticas.

No sería difícil acordar que para el sector agrícola cumplir con los planes en la situación agrícola actual es difícil y, por ende, va a ser más que una prueba de fuego para el plan de uso y manejo de suelos. Es probable que se multipliquen los casos de incumplimiento sin verdadera justificación agronómica. Si bien los responsables oficiales del plan, van a tener que seguir manteniendo cierto grado de flexibilidad, es en situaciones como estas en las que se pondrá a prueba los mecanismos de control, seguimiento y penalización previstas.

No queda otro camino que el trabajo conjunto junto a los técnicos acreditados, y los resultados en cuanto a identificación de omisos, planes mal

formulados que deben cambiar, identificación de incumplimiento de los planes y penalizaciones en curso, debe cobrar visibilidad. La falta actual de información en cuanto al control, y sus resultados, genera una sensación de ausencia de contralor la cual es percibida como negativa por técnicos y productores responsables (sobre todo los dispuestos a cumplir en tiempo y forma con los requerimientos legales).

Si bien nos consta que existe control, y la flexibilidad que precisa un plan de esta magnitud, que además está acompañando la marcha del plan, el MGAP no puede demorar en mostrar parte de los resultados anónimos de la fiscalización. Seguramente, deba seguirse apostando a más trabajo conjunto entre técnicos privados y técnicos del MGAP, manteniendo inclusive las excepciones allí donde aún persisten dudas razonables acerca de la capacidad real de estimación de las pérdidas de suelos de la USLE/RUSLE, hasta que la información permita laudarse estos casos espaciales.

Comentarios finales

Como en casi todos los órdenes de la vida, no es posible originalmente prever todas las desviaciones, bifurcaciones y externalidades, y menos aun las que pueden derivar de un plan tan ambicioso, necesario y urgente, que intenta modular y regular el uso del suelo a nivel de un país entero.

Como resultado de este proyecto nacional, tanto los actores directos, hasta una parte no menos importante de la sociedad en su conjunto, están tomando conciencia de la relevancia del cuidado del suelo, y que en un escenario de demanda cre-

Tabla 2. Previsión de componentes en los planes presentados al 2013-14, en relación a los observados y previsto en el corto plazo.

	Cereales de Invierno 2014	Cultivos Protectores Invierno 2014	Barbechos Invierno 2014	Gramíneas C ₄ Verano 2014-15	Soja Verano 2014-15	Cereales de Invierno 2015
	Área (ha)					
Previsto en los planes 2013-14, para:	782 698	431 173	315 040	223 187	1 207 447	721 894
Observado, según DIEA 2014-15	491 984	540 877	495 040	195 000	1 321 404	400 000*
Cambio en relación a los planificado (%)	-37.1	25.4	57.1	-12.6	9.4	-44.6

* Posible área máxima de cultivos de invierno.

ciente de alimentos, el futuro claramente depende de poder mantenerlo. Hoy, los nuevos Ingenieros Agrónomos, deben recibir formación específica, capacidad y entrenamiento, y para ello la Facultad de Agronomía ha tenido que adecuarse. En este sentido, desde el 2010 los nuevos técnicos (sobre todo los que orientan su formación hacia los sistemas agrícola-ganaderos y lecheros), salen al mercado preparados, seguramente como nunca.

Si los productores, empresarios y técnicos hubiesen tenido certezas en el 2013-14, del escenario actual de dificultades, seguramente el inicio del plan hubiese sido más dificultoso y los planes serían desde su origen más restrictivos. Sin embargo, aun con amenazas en el horizonte, seguramente muchos decidieron priorizar planes que pasaran el filtro de las tolerancias exigidas, ubicando los componentes más polémicos (como las gramíneas C4 y/o pasturas), hacia el final de la secuencia. Esto, en una realidad marcada por más del 60% de la tierra bajo arrendamiento, con contratos de corto plazo, que hará coincidir la renovación de muchos contratos con un posible cambio del agricultor, los cuales estarían obligados a cumplir con los componentes menos rentables o sin capacidad de pago de las rentas actuales (**Figura 3**). Sin duda y considerando que el dueño del campo es el responsable final del cumplimiento de los planes, solo cabe esperar un periodo conflictivo, en donde el desafío del sistema, tiene una dificultad adicional. El futuro del plan, sin duda va a depender de cómo se conduzca esta situación difícil.

En momentos de crisis es donde más valor cobra un emprendimiento nacional de este tipo y porte. Claramente, la verdadera prueba esta ocurriendo y pasarla depende de todos, no solo de los responsables oficiales. Es un trabajo que va a demandar un esfuerzo colectivo de todos. Sin duda, de la conducción del MGAP, de los técnicos acreditados, de los agricultores, pero como nunca de los responsables finales por el cuidado del suelo, los dueños de los campos quienes no pueden mantenerse aun ajenos.

Bibliografía

- Arbeleche, P., O. Ernst, y E. Hoffman.** 2010. La agricultura en Uruguay y su evolución In: Intensificación agrícola: oportunidades y amenazas para un país productivo y natural. Capítulo 1. García Préchac, F (ed.). CSIC –FAGRO-UDELAR. Uruguay.
- Clérici, C. y F. García Préchac.** 2001. Aplicaciones del modelo USLE/RUSLE para estimar pérdidas de suelos por erosión en Uruguay y la región de la cuenca del río de la plata. *Agrociencia* (2001). Vol V. N° 1. p. 92-103
- DIEA.** 2000. Censo general Agropecuario MGAP. <http://www.mgap.gub.uy/portal/>
- DIEA.** 2011. Censo general agropecuario MGAP. <http://www.mgap.gub.uy/portal/>
- DIEA.** 2013 Anuario estadístico agropecuario MGAP <http://www.mgap.gub.uy/portal/>
- DIEA.** 2014. Encuesta agrícola 2014. Serie 323. 17p. <http://www.mgap.gub.uy/portal/>
- Ernst, O.** 2013. Denunciando el presente, imaginando el futuro. *Cangüé* 34: 2-11. www.eemac.edu.uy/publicaciones/revista-canguee
- Hill, M., y C. Clérici.** 2011. Planes de uso y Manejo de Suelos. *INIA Revista* N° 26. pp. 65-69.
- Hill, M., y C. Clérici.** 2014. Planes de uso y responsable de suelos. Base de la política de conservación de suelos en Uruguay. In. Congreso Uruguayo de suelos de Uruguay y VI encuentro de la SUCS. www.sucs.org.uy
- Hill, M., y C. Clérici.** 2013. Implementación de planes de uso y manejo responsable del suelo. In III Simposio nacional de agricultura 2013. p. 167-170.
- Hoffman, E., A. Castro, y P. Arbeleche.** 2013a Área agrícola y superficie cultivada anualmente en Uruguay: implicancias de las diferencias en los números oficiales. In *Cangüé* Nro 34. pp 12-34.
- Klingebiel, A., y P.H. Montgomery.** 1961. Land capability classification. *Agricultural Handbook* 210. Washington D.C.. Soil Conservation Service. U.S.D.A. p. 21.
- Molfino, J.H.** 2013. Potencial agrícola, algunos números para la agricultura de secano. In *Cangüé* Nro 33: p. 14-18. www.eemac.edu.uy/cangue/joomdocs/cangue033_molfino.pdf
- USLE – RUSLE 6.0.** Rel- 1.0.8 <http://www.cebra.com.uy/renare/> 

[volver al índice](#)

Ley de fertilizantes para la conservación y el mejoramiento de la fertilidad de los suelos argentinos de uso agropecuario

Jorge E. Bassi¹ y Andrés A. Grasso¹

¹ Fertilizar Asociación Civil – info@fertilizar.org.ar

Resumen

La producción y la exportación de alimentos son piezas absolutamente claves y cada vez más trascendentes de la economía argentina. En este sentido, la evolución de los sistemas productivos en la Argentina ha registrado un cambio hacia una agricultura continua con el desplazamiento de la frontera agrícola hacia zonas tradicionalmente mixtas o ganaderas. Esto produjo una elevada extracción de nutrientes que no fueron repuestos en igual magnitud, generando procesos de degradación que ponen en peligro la sustentabilidad de los sistemas productivos. Excepto para nitrógeno (N) en cultivos de leguminosas como la soja, los nutrientes que se extraen de los suelos como consecuencia de la producción agropecuaria se reponen a través de la aplicación de fertilizantes. Los nutrientes que se extraen en mayor cantidad son nitrógeno (N), potasio (K) y fósforo (P), seguidos por azufre (S). El uso actual de fertilizantes en la Argentina genera una muy baja reposición de nutrientes y la degradación consecuente en el nivel de la disponibilidad de nutrientes ha sido documentada recientemente en un trabajo conjunto de INTA y Fertilizar. La reposición de nutrientes expresada como la relación entre la aplicación de nutrientes y la extracción realizada por los principales cultivos, se encuentra en promedio en el 25%.

En este contexto se presentó en la Honorable Cámara de Diputados de la Nación, un proyecto de ley cuyo principal objetivo es la conservación y mejoramiento de la fertilidad de los suelos de uso agropecuario, a través de la promoción del uso de fertilizantes para la actividad agropecuaria. Como instrumento de promoción, se propone incorporar como desgravación al impuesto a las ganancias, el 100 por ciento del gasto en fertilizantes que realice el titular de una explotación agropecuaria, en el período fiscal en el que se comercialice la producción en la cual se aplicaron los fertilizantes.

Con la implementación de la ley de promoción de uso de fertilizantes, que tiene fijado un hori-

zonte de 10 años, se pretende lograr un punto de inflexión en lo referido a la recuperación y sustentabilidad del capital natural de nuestros suelos, logrando un beneficio no sólo para el sector agropecuario sino para todos los habitantes de la Argentina, a través de una mejora económica y una consolidación del desarrollo sustentable de nuestro territorio.

Introducción

Tanto la producción como la exportación de alimentos (en sus variadas formas) se han transformado en piezas absolutamente claves y cada vez más trascendentes de la economía argentina. La siembra directa, los materiales genéticos, los fertilizantes, el uso de tecnología satelital, las sembradoras de precisión, los equipos de riego, han sido las principales herramientas que permitieron lograr notables incrementos en los rendimientos de nuestros cultivos. La aplicación de fertilizantes tiene un doble efecto, genera aumentos de rendimiento y a la vez repone los nutrientes que se exportan con la cosecha. Los nutrientes que se extraen en mayor cantidad son nitrógeno (N), fosforo (P) y potasio (K), seguidos por azufre (S).

La evolución de los sistemas productivos en la Argentina registra un cambio hacia una agricultura continua y el desplazamiento de la frontera agrícola hacia zonas tradicionalmente mixtas o ganaderas (Manuel.Navarrete et al., 2009; Viglizzo et al., 2011). Asimismo, se observa el reemplazo de cultivos tradicionales tales como el trigo y el maíz por otros de mayor atractivo económico como la soja que, además, posibilita su combinación con el ciclo del trigo de tal forma de obtener dos cosechas en un año. Debido a esto, en dos décadas hubo un aumento del 75% en el área sembrada, pasando de 21 000 000 ha en 1990/91 a 37 000 000 ha en la última campaña 2013/14 y en el mismo período se ha triplicado la producción de granos (**Figura 1**).

Históricamente, la aplicación de fertilizantes en Argentina estaba enfocada a sistemas intensivos y cultivos regionales. A partir de la década del '90 comienza el uso de fertilizantes en la producción de granos y el consumo de fertilizantes creció sostenidamente hasta el año 2007 en el cual alcanzo 3.7 MM t. A partir de allí, el consumo se amesetó en alrededor de los 3 MM t, mostrando a la fecha casi 10 años de estancamiento (Figura 2). Este comportamiento puede ser explicado por la disminución en el área sembrada de gramíneas en favor del aumento del área sembrada de soja ya que en nuestro país las gramíneas son los cultivos en donde la dosis de fertilización es más elevada (Figura 3). El crecimiento de la producción con bajas dosis de fertilizante degradó la calidad de nuestros suelos, ya que la elevada extracción de nutrientes no fue correspondida en igual magnitud por la aplicación.

La reposición de nutrientes expresada como la relación entre la aplicación y la extracción realizada por la producción agropecuaria, es un buen indicador de la sostenibilidad de la fertilidad química del suelo. En la actualidad, la reposición de los principales nutrientes (N, P, K y S) se encuentra en promedio en 25% para los principales cultivos

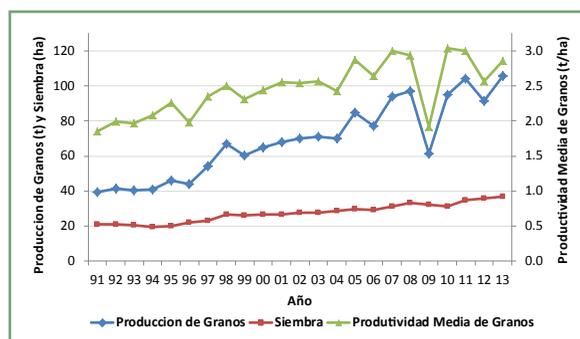


Figura 1. Evolución del área de siembra y producción de granos (MAGyP, 2014).

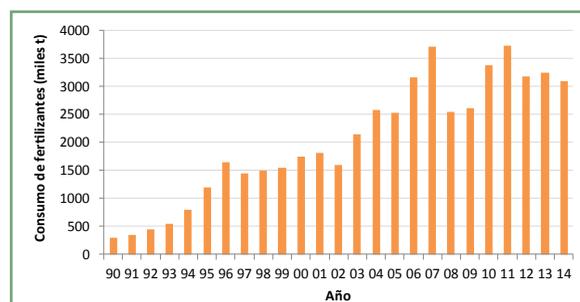


Figura 2. Evolución del consumo de fertilizantes en la Argentina (CIAFA – Fertilizar AC, 2014).

de grano (maíz, trigo, soja y girasol), siendo el P el nutriente que más se repone alcanzando un 50% (Figura 4). Cuando analizamos la reposición de nutrientes en cada uno de los cultivos vemos que trigo y maíz son los cultivos donde más nutrientes se reponen mientras que en la soja, a pesar de que se toma en cuenta el aporte de la fijación biológica de N, los niveles de reposición son los más bajos (Figura 5).

Estos niveles de reposición de nutrientes indican que el sistema productivo actual no es sustentable, actualmente ya limita los rendimientos y, de continuar esta tendencia, se condicionará el crecimiento de la producción agrícola nacional. Por otra parte, una muy baja frecuencia de gramíneas en la secuencia agrícola genera un aporte de carbono menor al necesario para mantener el nivel de materia orgánica (MO) de los suelos y generar el rastrojo necesario para evitar los daños de la erosión (Novelli et al., 2011). Diversos autores han demostrado que al menos es necesaria una

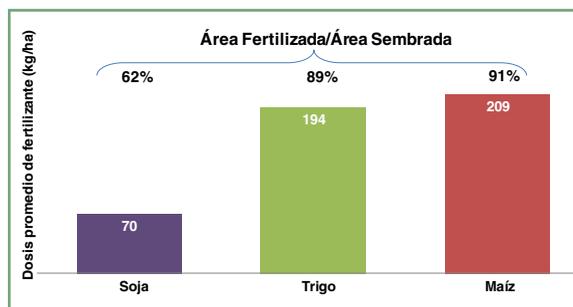


Figura 3. Dosis de fertilizante promedio (kg/ha) y penetración de la tecnología de fertilización (expresado en % del área fertilizada en relación al área sembrada) en la Región Pampeana para la campaña 2013/14. La dosis promedio se calculó sobre la superficie sembrada (Fertilizar Asociación Civil, datos no publicados).

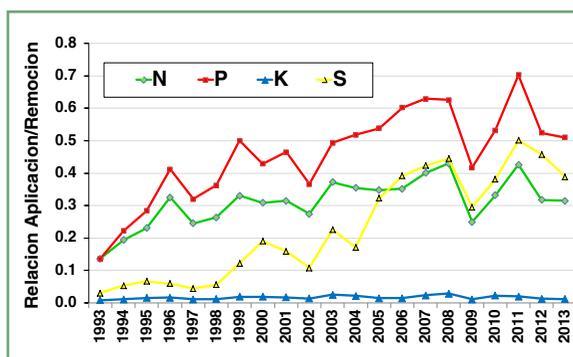


Figura 4. Reposición de nutrientes: Relaciones Aplicación/Extracción de N, P, K y S en cultivos extensivos, 1993-2013. Adaptado de García y González Sanjuán (2012).

gramínea de alto rendimiento en el dos de cada tres años, para lograr mantener los niveles de materia orgánica (Studdert y Echeverría, 2000; Vivas et al., 2012; García et al., 2010).

Fertilidad prístina y actual de los suelos pampeanos

La importante disminución de los niveles de P extractable, K intercambiable, Zn y MO de los suelos de la Pampa Húmeda ha sido comprobada por los estudios realizados por INTA y Fertilizar (Sainz Rosas et al., 2011, 2012, 2013). Partiendo de una condición excepcionalmente buena, los suelos se han ido degradando en su calidad. Los resultados hallados concuerdan con los cálculos teóricos. El P, que presenta altos índices de cosecha, sufrió una muy importante caída en la región, llevando al 70% de las tierras por debajo de los índices de

suficiencia para la producción agrícola. Esta es una de las razones por las cuales es el nutriente con mayor índice de reposición.

El K es un nutriente con menores tasas de extracción en los cultivos de granos, ya que la mayor parte del mismo vuelve al suelo junto con el rastrojo. Si bien el contenido de los suelos ha mermado notoriamente, su nivel es aceptable y se encuentra aún por encima de los rangos críticos. Es necesario su monitoreo constante para no llegar a niveles de deficiencia.

La MO ha sufrido un deterioro significativo respecto de los niveles originales de los suelos agrícolas pampeanos (Sainz Rozas et al., 2011). No podemos definir el impacto de agricultura tradicional con arado y el impacto de las últimas décadas de agricultura continua sin labranzas. Sin embargo, hay que destacar que las actuales técnicas de producción permiten sostener los niveles de MO. El uso de siembra directa con una adecuada frecuencia de gramíneas en la secuencia de cultivos (los estudios demuestran que las rotaciones deben incluir cereales en al menos el 50% de los años) y altos rendimientos, genera un aporte de carbono que compensa las pérdidas por mineralización y erosión (Thomas, 2001). El uso de fertilizantes, al aumentar el rendimiento de los cultivos, tiene un efecto positivo sobre el contenido de MO del suelo (Morón, 2003; Vivas et al., 2012). Queda en evidencia que corrigiendo la elección de cultivos y la dosis de fertilizante, podemos generar sistemas sustentables para la agricultura de la Pampa Húmeda.

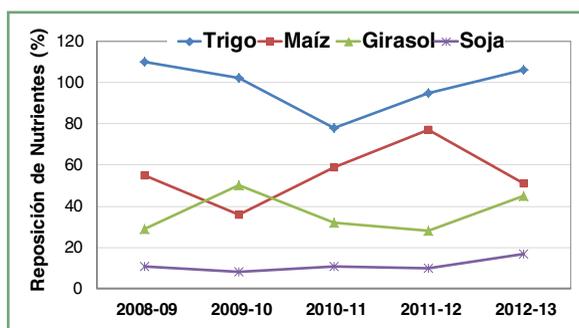


Figura 5. Reposición de nutrientes por cultivo: Relaciones Aplicación/Extracción 2008-2012. En soja se estima que el 60% de los requerimientos fueron aportados por la fijación biológica de N (Fertilizar AC, 2014).

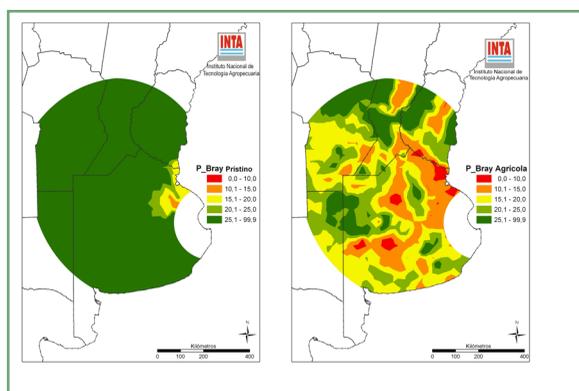


Figura 6. Distribución de los niveles de P-Bray (mg kg⁻¹) del horizonte superficial (0-20 cm) en suelos prístinos y agrícolas de la región pampeana argentina. Los colores indican rangos de concentración. (Sainz Rozas et al., 2013).

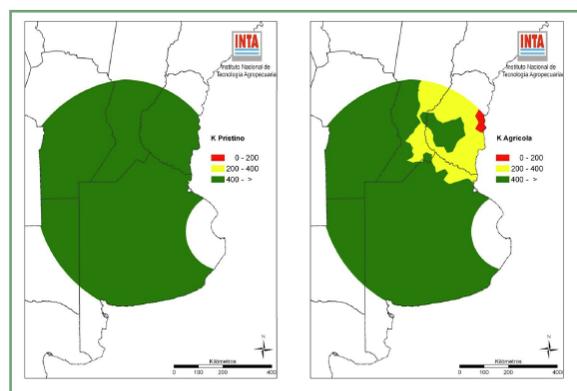


Figura 7. Distribución de concentración de K intercambiable (mg kg⁻¹) del horizonte superficial (0-20 cm) en suelos prístinos y agrícolas de la región pampeana. Los colores indican los rangos de concentración. (Sainz Rozas et al., 2013).

Cálculo económico de la reposición de nutrientes

Fertilizar Asociación Civil y CIAFA (Cámara Argentina de la Industria de Fertilizantes y Agroquímicos) han realizado un análisis técnico-económico de la extracción de nutrientes para el período 2012/2013. Para calcular el costo se tomaron en cuenta los precios de los principales fertilizantes utilizados en la Argentina a partir del valor por unidad de elemento extraído en U\$S por t para el año 2013.

Como se observa en la **Tabla 1**, las pérdidas de nutrientes pueden valorizarse en 2.850 MM de U\$S de los cuales aproximadamente un tercio corresponden al K. Este valor representa menos del 5% de la producción generada en esta superficie.

Ley de Promoción de Uso de Fertilizantes

Dada la situación de uso de fertilizantes y reposición de nutrientes, y el impacto que esta práctica tiene sobre los niveles de producción agropecuaria y la sustentabilidad del recurso suelo, en el año 2014 se presentó en la Honorable Cámara de Diputados de la Nación un proyecto de ley con el objetivo de la conservación y mejoramiento de la fertilidad de los suelos de uso agropecuario a través de la promoción del uso de fertilizantes para la actividad agropecuaria. El proyecto de ley presentado por el Presidente de la Comisión de Agricultura, Diputado Luis Basterra, fue elaborado por un grupo de trabajo interdisciplinario en las que participaron ONG de diferentes extracciones.

Como instrumento de promoción se propone desgravar del impuesto a las ganancias, el 100 por ciento del gasto en fertilizantes que realice

el titular de una explotación agropecuaria, en el período fiscal en el que se comercialice la producción en la cual se aplicaron los fertilizantes. La promoción se plantea por un período de 10 años. Para poder obtener la desgravación pertinente, los productores agropecuarios deben presentar un plan de siembra aprobado por un profesional de las ciencias agrarias y un análisis de suelos georeferenciado por cada lote de producción.

Análisis del Impacto Esperado

La promoción del uso de fertilizantes puede lograr un punto de inflexión fundamental en el tratamiento de los suelos agrícolas y ganaderos. Un mayor uso de fertilizantes favorecerá los rendimientos y la reposición de nutrientes. Una desgravación como la planteada, generará una mayor competitividad de las gramíneas por sobre las leguminosas (que prácticamente no utilizan fertilizante) y un aumento de rendimientos, por lo que generará un doble efecto positivo sobre el nivel de MO de nuestros suelos. Para ello, el proyecto de ley hace hincapié en la necesidad de elaborar un plan de siembra y de fertilización supervisados por un profesional agrónomo con competencia en el tema fertilizantes y un compromiso del productor agropecuario para el cumplimiento del mismo ya que el régimen de promoción sólo podrá tener éxito si se pone el foco en las buenas prácticas agropecuarias. Al no ser una promoción de uso específico, los cultivos de cobertura, forrajeros y de economías regionales, también se verán beneficiados por la promoción.

La recuperación del capital natural en nuestros suelos permitirá:

a. Mantener el nivel de fertilidad de los mismos

Tabla 1. Valorización de la Extracción de nutrientes campaña 2012/13 (CIAFA-Fertilizar AC, 2014).

	Nitrógeno (N)	Fósforo (P)	Potasio (K)	Azufre (S)	Total
Extracción (t)	1.804.740	433.704	1.029.158	222.214	3.489.816
Reposición (t)	577.500	221.189	10.292	86.650	895.631
Diferencia (t)	1.227.240	212.515	1.018.866	135.564	2.594.185
Fertilizantes Comerciales	Urea	Superfosfato Triple	Cloruro de Potasio	Superfosfato Simple	
Fertilizantes (t ajustadas*)	2.667.913	503.828	2.037.732	1.129.700	6.510.000
Importe Total (MM U\$S)	1.307	262	917	373	2.859

*Se ajustaron las toneladas de Superfosfato Triple, descontando el aporte de fósforo del Superfosfato Simple.

- para las generaciones futuras
- b. Colaborará sensiblemente a aumentar los rendimientos de los cultivos en general, produciendo así más alimentos
- c. Permitirá que haya un menor interés en el uso de tierras hoy naturales, ya que la demanda de alimentos puede ser atendida por el aumento de productividad en la actual superficie
- d. Mejorará la economía de nuestro país por una mayor actividad, favoreciendo así a todos sus habitantes
- e. Permitirá una fuerte suba en nuestras exportaciones
- f. Mejorará la calidad de los alimentos que consumimos y exportamos

Un aspecto que se considera central para el seguimiento de la recuperación y sustentabilidad del capital natural de los suelos es la obligación de realizar estudios periódicos de fertilidad del suelo bajo cultivo con muestras georeferenciadas, a cargo de los productores agropecuarios. Esta información proveniente de los titulares de explotaciones agropecuarias que accedan al régimen, podrá ser administrada por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, integrando toda la información en una Base de Datos de acceso público.

Consideraciones Finales

La implementación de una ley de promoción de uso de fertilizantes como la planteada, ayudará en forma importante a la recuperación y sustentabilidad del capital natural de nuestros suelos. Sus beneficios exceden al sector agropecuario, alcanzando a la sociedad toda en el cuidado del ambiente y los recursos estratégicos.

Bibliografía

CIAFA. 2014. En <http://www.ciafa.org.ar/ferti2.html>

Fertilizar AC. 2014 En http://www.fertilizar.org.ar/?page_id=468

García, F.O., y M.F. González Sanjuán. 2012. La nutrición de suelos y cultivos y el balance de nutrientes: ¿Cómo estamos? *Revista Fertilizar* 24:4-9 pp.

García, F., M. Boxler, J. Minteguiaga, R. Pozzi, L. Firpo, I. Ciampitti, A. Correndo, F. Bauschen, A. Bernardo, y N. Reussi Calvo. 2010. *La Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe.* 2a Ed. Buenos Aires, AACREA. 2010: 30-34 pp.

MAGyP. 2014. En http://www.siiia.gov.ar/_apps/siia/buscador/mostrar.php

Manuel-Navarrete, D., G. Gallopin, M. Blanco, M.

Díaz-Zorita, D. Ferraro, H. Herzer, P. Latorra, M. Murrin, G. Podesta, y J. Rabinovich. 2009. Multi-causal and integrated assessment of sustainability: The case of agriculturalization in the Argentine pampas. *Environ. Dev. Sustain.* 11, 621–638.

Morón, A. 2003. Efecto de las rotaciones Cultivos-Pasturas sobre la fertilidad de los suelos en ensayos de larga duración del INIA La Estanzuela (1963-2003). *Informaciones Agronómicas* 20.

Novelli, L.E., O.P. Caviglia, y R.J.M. Melchiori. 2011. Impact of soybean cropping frequency on soil carbon storage in Mollisols and Vertisols. *Geoderma* 167–168, 254–260.

Sainz Rozas, H., H. Echeverría, y H. Angelini. 2011. Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana argentina. *Cienc. Suelo* 29, 29–37.

Sainz Rozas, H., H. Echeverría, y H. Angelini. 2012. Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región Pampeana y ExtraPampeana argentina. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias* 38 33-39. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86423614007>.

Sainz Rosas H., M. Eyherabide, H. Echeverría, P. Barbieri, H. Angelini, G. Larrea, G. Ferraris, y M. Barraco. 2013. ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos? *Acta Simposio Fertilidad 2013 “Nutrición de Cultivos para la Intensificación Productiva Sustentable.* Rosario: 62-72 pp.

Studdert, G.A., y H.E. Echeverría. 2010. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 1496–1503.

Thomas, E. 2001. Evolución de carbono orgánico edáfico en las series Hansen y General Baldissera bajo agricultura continúa. Aplicación de un modelo de simulación. Tesis de especialista. Programa de Especialización “Procesos de los nutrientes y manejo de la fertilización de los cultivos” (Convenio Fundación AACREA-UIB). Área de Postgrado en Producción Vegetal. Facultad de Ciencias Agrarias - Universidad Nacional de Mar del Plata. Estación Experimental Agropecuaria de Balcarce-INTA. Balcarce (Argentina) 43 pp.

Viglizzo, E.F., F.C. Frank, L.V. Carreno, E.G. Jobbagy, H. Pereyra, J. Clatt, D. Pincen, y F.M. Ricard. 2011. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Glob. Chang. Biol.* 17, 959–973.

Vivas, H., R. Albrecht, L. Martins, H.L. y Hotián. 2012. Alternativas de fertilización del doble cultivo trigo/soja. Efectos sobre la productividad y algunas propiedades del suelo, *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 7: 11- 15.

[volver al índice](#)

Producción de granos y adopción de tecnología en Argentina

Juan M. Brihet¹

¹Dpto. de Estimaciones Agrícolas, Bolsa de Cereales

*Contacto: jrbrihet@bc.org.ar

Introducción

Desde aproximadamente el año 2000, el Departamento de Estimaciones y Proyecciones Agrícolas de la Bolsa de Cereales trabaja en la generación de información acerca de la situación de cada cultivo respecto del área y la producción en Argentina, bajo el marco del Panorama Agrícola Semanal (PAS). Recabando datos para soja, trigo, maíz, girasol, sorgo y cebada, se obtiene información de forma periódica para actualizar el estado de la producción agrícola nacional, desarrollando distintos análisis bajo una zonificación que divide al país en 15 regiones agroecológicamente homogéneas (Figura 1).

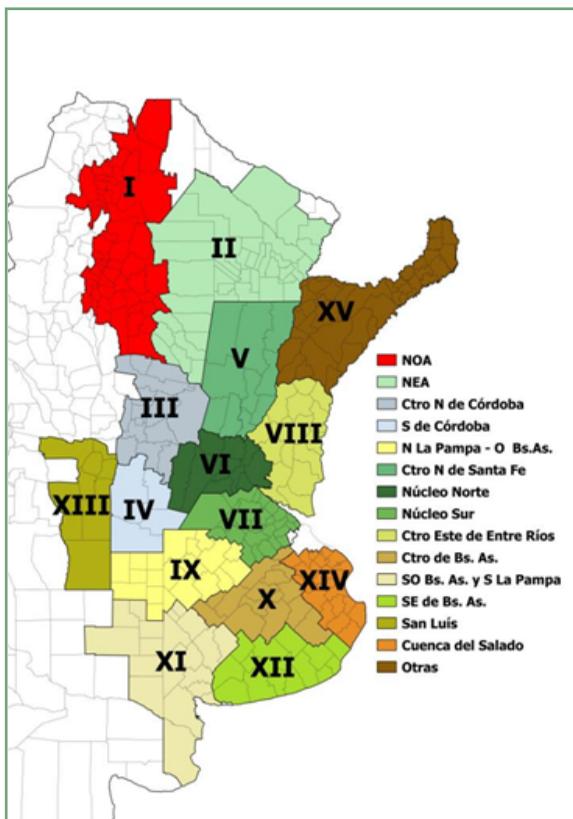


Figura 1. Zonificación PAS, con las 15 regiones agrícolas de Argentina. Dpto. de Estimaciones Agrícolas, Bolsa de Cereales.

Producción de granos en Argentina

Durante la última campaña agrícola 2013/14, en Argentina se sembraron más de 31 millones de hectáreas con los principales cultivos extensivos de grano, considerando soja, trigo, maíz, girasol, sorgo y cebada. Con esta superficie implantada, se logró a fin de cosecha una producción superior a las 102 millones de toneladas de granos.

El área sembrada para el ciclo 2013/14 se distribuyó entre los seis cultivos bajo estudio, con soja ocupando el 64% de la misma, seguida por

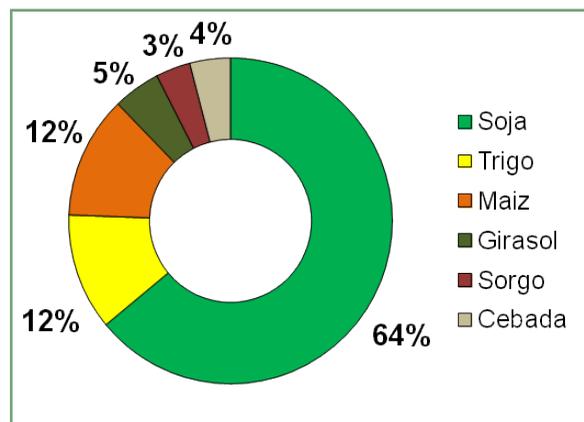


Figura 2. Distribución relativa del área sembrada en Argentina, campaña 2013/14.

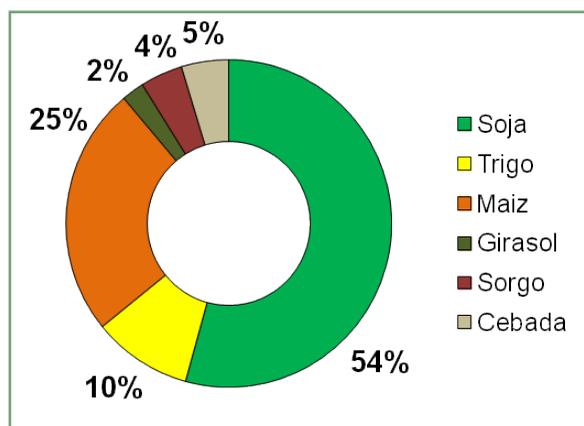


Figura 3. Distribución relativa de la producción de granos en Argentina, campaña 2013/14.

maíz y trigo con el 12%, respectivamente. El girasol ocupó el 5% de la región agrícola nacional, mientras que sorgo y cebada lo hicieron en un 3 y 4%, respectivamente (**Figura 2**). Un análisis similar, basado en la distribución de la producción de grano, devuelve que el 54% de la cosecha fue aportado por soja, mientras que otro 25% fue aportado por maíz. En orden de importancia, siguió trigo con una contribución del 10%, y luego cebada con el 5%, sorgo con el 4% y por último girasol con apenas el 2% sobre la cosecha final a nivel nacional (**Figura 3**).

Por otro lado, esta producción del ciclo 2013/14 se logró en base a rendimientos que en general fueron superiores a los de la campaña anterior, considerando los promedios nacionales para cada cultivo. Sobre esto último, en la **Figura 4** se ilustra el rendimiento medio a cierre de cosecha para cada grano en Argentina.

En relación a los datos para los cuatro principales cultivos de grano, se puede considerar el aporte que hace cada región al total nacional, tanto respecto del área sembrada como de la producción final obtenida. En base a estas relaciones, se puede identificar la importancia de cada grano en Argentina, y también la contribución que realiza cada zona productiva dentro de la distribución regional para cada cultivo.

Para la campaña 2013/14, el 43% del área total sembrada con soja se ubicó en las zonas del Núcleo Norte (centro de Santa Fe, este de Córdoba y sudoeste de Entre Ríos), el Núcleo Sur (Norte de Buenos Aires y Sur de Santa Fe) y el Centro-Norte de Córdoba, las cuales representaron respectivamente el 18%, 14% y 11% del área sembrada a nivel nacional para este cultivo. Respecto de la producción, estas regiones aportaron el 51% de

la cosecha total, a razón del 21%, 16% y 14% para cada zona.

El cultivo de trigo concentró el 40% de su área sembrada en sólo dos regiones: el Sudoeste y el Sudeste de Buenos Aires, con una representación del 22% y el 18%, respectivamente, sobre el total nacional. Estas mismas zonas son las que aportaron el 48% de la producción final a cosecha, a la que cada una contribuyó con el 18% y 30%, respectivamente.

En maíz, el 39% de la siembra 2013/14 se ubicó en las zonas del Centro-Norte de Córdoba, el Sur de Córdoba y el Norte de La Pampa-Oeste de Buenos Aires. La primera de estas tres regiones aportó el 16% de la superficie nacional, mientras que las otras dos contribuyeron con un 11% cada una. Sin embargo, el 43% de la producción se ubicó en el Centro-Norte de Córdoba y el Sur de Córdoba, así como también en el Núcleo Norte. A su vez, la primera de éstas aportó el 19% del grano total cosechado, mientras que las otras dos aportaron un 12% cada una.

Por último, el cultivo de girasol evidenció al 54% del área nacional sembrada en sólo dos zonas: el Sudoeste de Buenos Aires-Sur de La Pampa, con el 28%, y el Sudeste de Buenos Aires, con el 26%. De igual forma, la producción del ciclo 2013/14 se concentró también en estas dos regiones, las cuales representaron al 52% del total; individualmente aportaron el 32% y el 20%, respectivamente.

Adopción de tecnología en Argentina

Distribución por niveles

En el año 2011 en la Bolsa de Cereales se dio inicio a una línea de investigación conjunta entre el Departamento de Estimaciones y Proyecciones Agrícolas y el Instituto de Estudios Económicos. A partir de una necesidad interna de información y de la interacción entre los distintos sectores, se desarrolló el Relevamiento de Tecnología Agrícola Aplicada (ReTAA). Este trabajo de investigación caracteriza la situación tecnológico-productiva de la Argentina de forma periódica, sobre la base de seis cultivos, diecisiete regiones (**Figura 5**) y el concepto de Nivel Tecnológico (NT).

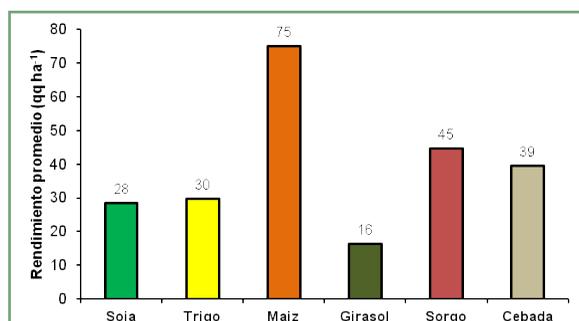


Figura 4. Rendimiento promedio nacional por cultivo. Campaña 2013/14.

La noción de NT considera tanto al manejo agronómico como al nivel de insumos utilizado en cada planteo productivo, de forma tal de identificar con un alto grado de detalle la adopción de tecnología en nuestro país. Esto último se desarrolla en el ReTAA para cada cultivo y cada una de las regiones, categorizado en tres niveles distintos – Alto, Medio y Bajo – que reflejan el grado tecnológico del planteo utilizado, cada uno con una estructura de más de 60 variables que abarcan desde el tipo de labranza y la semilla utilizada a la siembra, hasta la fertilización y el manejo de fitosanitarios.

Si bien la metodología original del trabajo y sus dos versiones a la fecha se encuentran publicadas, tanto en versión impresa como digital (Bolsa de Cereales, 2015), es válido destacar los principales resultados y su relación con la producción agrícola de nuestro país. Para Argentina se realizaron dos relevamientos no consecutivos a campaña cerrada, identificando la adopción de tecnología en la producción de los seis cultivos de grano bajo estudio. Para las campañas agrícolas 2010/11 y 2012/13, los resultados caracterizan la distribución de niveles tecnológicos en los planteos agronómicos adoptados a nivel regional (Figuras 6 y 7).

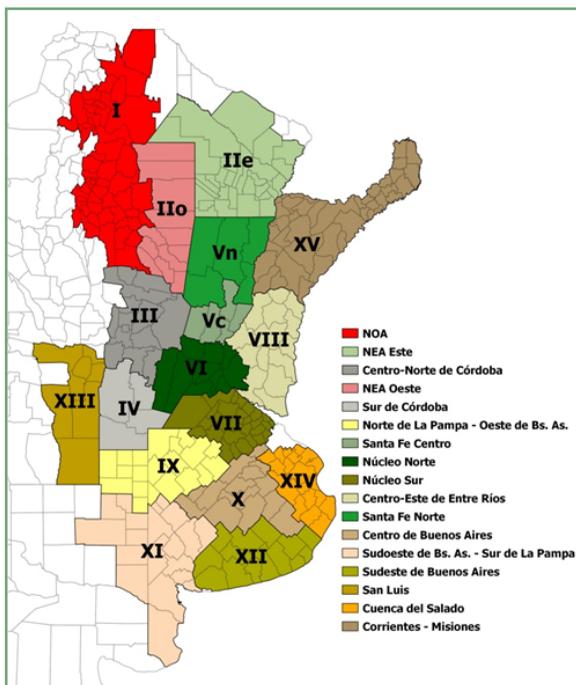


Figura 5. Zonificación ReTAA, con 17 regiones agrícolas. Dpto. de Estimaciones Agrícolas, Bolsa de Cereales.

En el primer relevamiento del ciclo 2010/11, se encontró que en la Argentina un 47% de la producción se realizó con un nivel Alto de tecnología, mientras que otro 42% se manejó en un nivel Medio y el 11% restante correspondió a un nivel tecnológico Bajo. Estos datos consideran el manejo agronómico y los insumos aplicados en cada uno de los cultivos analizados, para las diecisiete regiones agrícolas del país, teniendo en

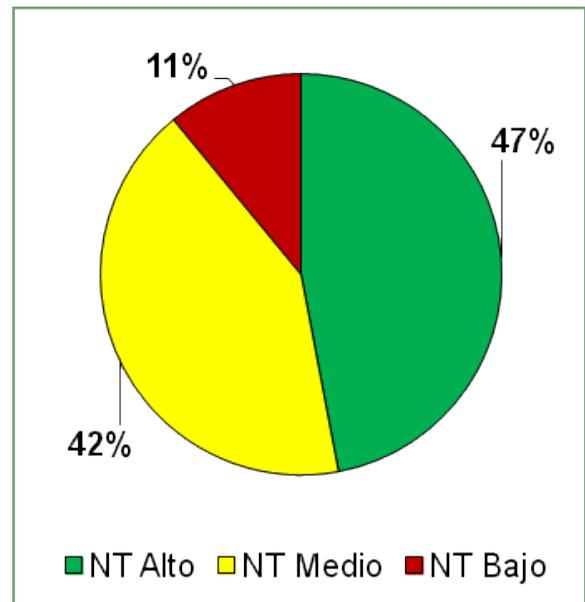


Figura 6. Distribución (%) de Niveles Tecnológicos en Argentina, campaña 2010/11.

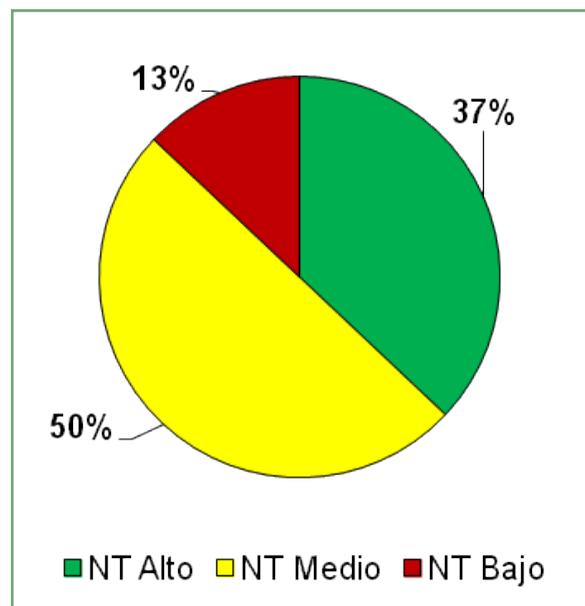


Figura 7. Distribución (%) de Niveles Tecnológicos en Argentina, campaña 2012/13.

cuenta el peso relativo según el área sembrada en cada caso. Para el segundo ciclo del estudio, campaña 2012/13, los resultados de adopción mostraron que el nivel Alto ocupó un 37% del total relevado en Argentina, mientras que el nivel Medio fue un 50% y el nivel Bajo un 13%.

Se puede observar que entre ambas campañas ocurrió una caída en la adopción de niveles altos de tecnología, con un traslado mayormente hacia niveles medios y en menor medida hacia niveles bajos. La merma de 10 puntos porcentuales del nivel Alto se trasladó al nivel Medio, en consecuencia con un incremento de 8 puntos porcentuales, y al nivel Bajo que aumentó 2 puntos porcentuales.

A su vez, el análisis puede segmentarse por cultivo y encontrar las variaciones respecto de la adopción de tecnología para cada grano (Figura 8). Con los resultados del relevamiento 2012/13 se observa que cultivos como maíz y cebada son los que demuestran mayor adopción de tecnología Alta, mientras que en otros como girasol y sorgo es donde el nivel Medio de tecnología se expresa fuertemente. El cultivo de trigo es el que evidencia la mayor adopción de nivel Bajo de tecnología, seguido de cerca por sorgo.

Al realizar la comparación entre ambas campañas relevadas, y con los datos por cultivo y nivel tecnológico, se observa que se da una caída generalizada en la adopción de nivel Alto, principalmente en cebada (Figura 9). Seguida a ella, en orden de importancia, se encuentran la soja y el trigo y, de cerca, el maíz y el sorgo; el cultivo de girasol fue el que menor pérdida tuvo de alta tecnología. A su vez, este último fue el que mostró el mayor incremento en la adopción de nivel Medio, secundado por el sorgo. Los au-

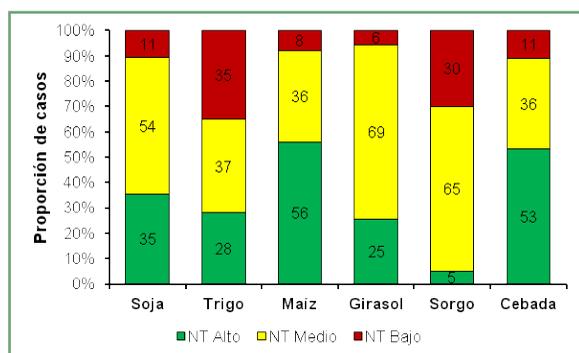


Figura 8. Distribución (%) de Niveles Tecnológicos por cultivo, campaña 2012/13.

mentos más significativos en la porción de nivel Bajo de tecnología se dieron en trigo y, en menor medida, en cebada.

La interacción entre las distintas variables de manejo y la aplicación del tipo y cantidad de los insumos determinan estas variaciones que se observan entre los ciclos 2010/11 y 2012/13, con causas que pueden atribuirse a factores climáticos propios de cada campaña y al esquema de costos a nivel de productor, entre otros. Al aumentar el grado de análisis y empezar a revisar la información relevada para un cultivo en cada una de las diecisiete regiones agrícolas del país, empiezan a entenderse muchos aspectos de los resultados y también su heterogeneidad espacial y temporal.

Nutrientes y fertilización

En muchos casos, el nivel de tecnología adoptado en un cultivo responde, entre otros factores, a la fertilización aplicada durante el ciclo productivo. Este es un aspecto que no sólo muestra fuertes variaciones entre cultivos, sino que a su vez lo hace entre regiones, encontrando diferencias según el tipo de ambiente en el cual se lleva adelante la producción.

En Argentina, en el ciclo 2012/13, se aplicaron más de 2.3 millones de toneladas de fertilizantes, considerando los cultivos de soja, trigo, maíz, girasol, sorgo y cebada. De igual forma, lo último representa cerca de 735 mil toneladas (t) de nutrientes, siendo más de 464 mil t de nitrógeno (N), casi 215 mil t de fósforo (P) y cerca de 55 mil t de azufre (S). Por otro lado, la extracción de nutrientes que realiza cada cultivo al momento de

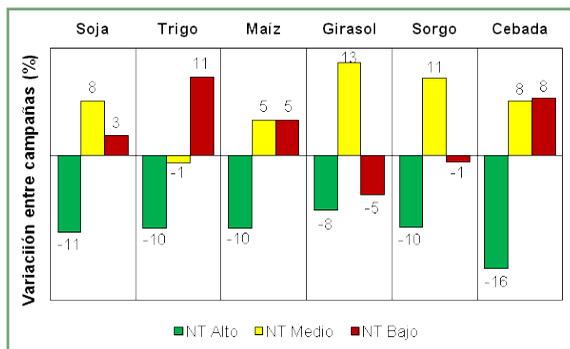


Figura 9. Variación por cultivo en la distribución (%) de Niveles Tecnológicos entre campañas 2010/11 y 2012/13.

cosecha es también variable, y se observa una gran heterogeneidad en los resultados de balance según cada zona y cultivo.

Si se analiza el balance de nutrientes en nuestro país en base a datos del ReTAA para la campaña 2012/13, el resultado devuelve una reposición del 54% en P, del 25% en N y del 28% en S (Figura 10). Estos valores responden al análisis puntual de los cuatro principales cultivos de grano, bajo el modelo de “caja negra”, utilizando el balance entre los nutrientes extraídos en el grano cosechado y los repuestos al suelo por fertilización durante el ciclo del cultivo.

Los datos generados por el ReTAA se pueden presentar también en mapas, que en este caso

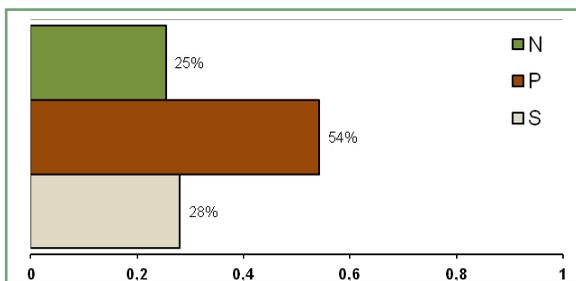


Figura 10. Porcentaje de reposición de nutrientes en Argentina, campaña 2012/13.

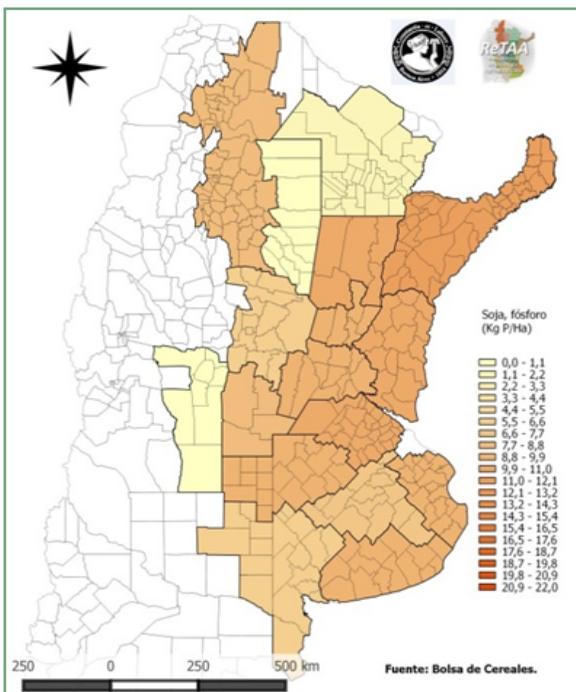


Figura 11. Dosis media zonal (kg ha⁻¹) para Fósforo (P) aplicado en Soja, campaña 2012/13.

identifican el nivel de adopción de un fertilizante en cada zona; puntualmente se presenta la dosis media zonal como nutriente aplicado, para así poder comparar y relacionar distintas fuentes de información (Figuras 11 y 12). Esto nos permite observar en qué regiones la aplicación es mayor o menor y entender por qué existe una variación tan grande.

Por otro lado, esto también responde al tipo de cultivo que se analice: para el ciclo 2012/13, del total de fertilizantes nitrogenados, el 54% se aplicó en maíz, mientras que el 22% y 19% fueron para trigo y cebada, respectivamente (Figura 13). Es para destacar que tres de los seis cultivos relevados concentran el 95% de la aplicación de productos nitrogenados, siendo todos ellos cereales. Respecto de la aplicación de P, el panorama cambia y el mayor porcentaje se observó en soja, con un 48% de aplicación del total de productos fosforados. Luego se ubicó el maíz con el 27% en este rubro, y detrás el trigo y la cebada, ambos con valores alrededor del 10% sobre el total aplicado (Figura 14).

Las relaciones que se pueden plantear a partir de la información que brinda el ReTAA son numerosas y muy variadas, aunque es destacable la concordancia que en muchos casos existe

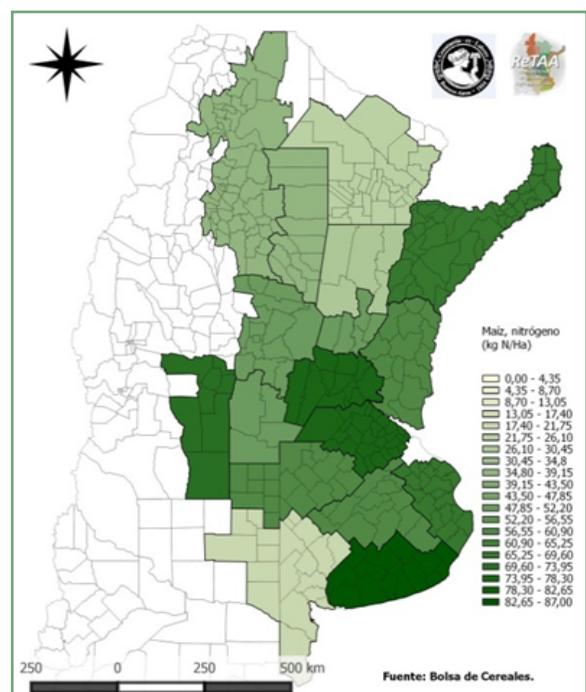


Figura 12. Dosis media zonal (kg ha⁻¹) para nitrógeno (P) aplicado en maíz, campaña 2012/13.

entre el nivel tecnológico y productivo de un cultivo en una determinada zona y el manejo de los nutrientes durante su ciclo. La generación de información respecto de estos temas y su entendimiento a partir de herramientas adecuadas, permiten seguir mejorando los enfoques sobre la producción y, de esta forma, rediseñar estrategias para aumentar la eficiencia de los procesos en el sector agroalimentario.

Bibliografía

Bolsa de Cereales. 2015. Relevamiento de Tecnología Agrícola Aplicada. Disponible en: <http://www.bolsadecereales.org/retaa>

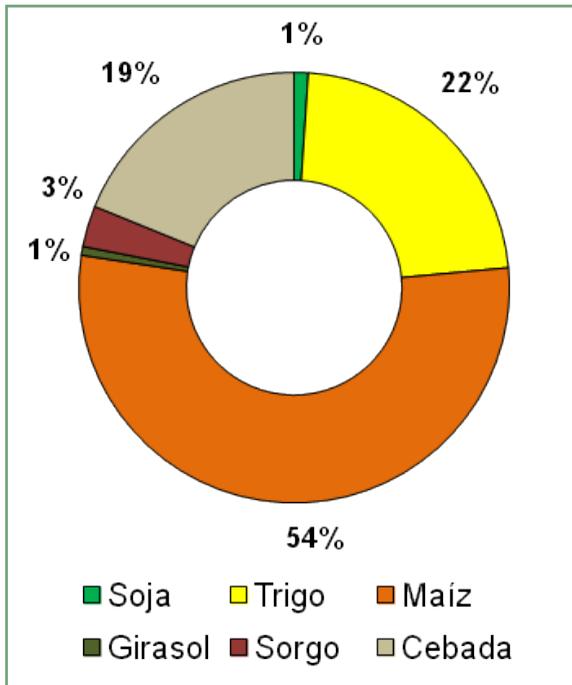


Figura 13. Distribución por cultivo del total de fertilizante nitrogenado aplicado en Argentina, campaña 2012/13.

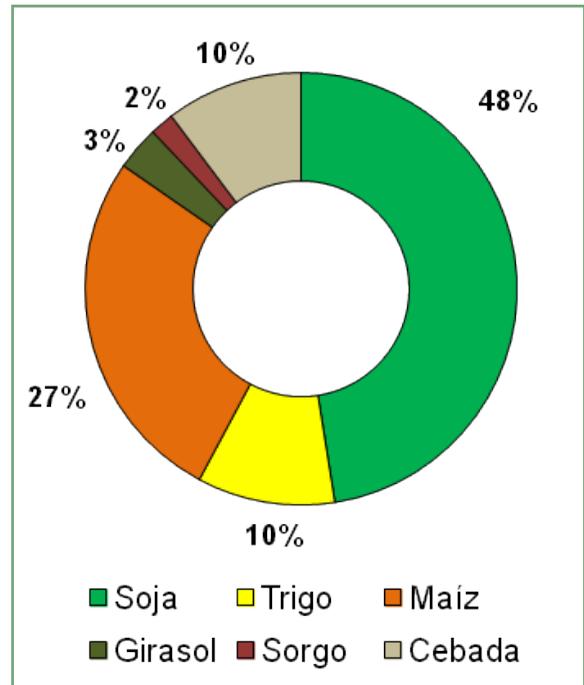


Figura 14. Distribución por cultivo del total de fertilizante fosforado aplicado en Argentina, campaña 2012/13.

[volver al índice](#)

Atlas Mundial de Brechas de Rendimiento: Trigo, soja y maíz en Argentina

Juan Pablo Monzón^{1,2,3}

¹Universidad de Mar del Plata; ²INTA; ³CONICET

*Contacto: monzon.jp@gmail.com

Son integrantes del proyecto "Global Yield Gap Atlas" para Argentina:

Patricio Grassini, Universidad de Nebraska, Estados Unidos

Fernando Aramburu, y Fernando Andrade (Universidad de Mar del Plata/INTA/CONICET)

Jorge Luis Mercau y Esteban Jobbagy, Grupo de Estudios Ambientales (CONICET/UNSL/INTA)

Miguel Angel Taboada (INTA)

Antonio Hall (Universidad de Buenos Aires)

¿Por qué un atlas mundial de brechas de rendimiento?

¿Cuánto más alimento puede producir el mundo con la disponibilidad actual de tierra cultivable y agua disponible? El Atlas Mundial de Brechas de Rendimiento puede proveer la respuesta. Para el 2050 vamos a tener que producir alimentos para 9200 millones de habitantes, al mismo tiempo, preservando áreas ricas en biodiversidad y servicios ecosistémicos. Para cumplir con estos objetivos necesitamos alcanzar altos rendimientos en cada hectárea de tierra que se encuentra actualmente cultivada (van Ittersum et al., 2013). Por eso, es necesario intensificar de forma sustentable los actuales sistemas de producción. Investigadores de la Universidad de Nebraska (Estados Unidos) y Wageningen (Países Bajos), liderados por los Dres. Kenneth Cassman y Martin van Ittersum, están llevando adelante un esfuerzo internacional para crear un Atlas Mundial de Brechas de Rendimiento: un avanzado sistema de modelación de cultivos y mapeo agroclimático usado para cuantificar cuanto alimento adicional puede ser producido al reducir las brechas entre (i) el rendimiento promedio logrado por los productores (Ya) y (ii) el rendimiento potencial que se define a partir del clima, genotipo y suelo (Yp para riego o Yw para condiciones de secano, **Figura 1**).

A través de su sitio web (www.yieldgap.org), el Atlas provee el primer mapa global interactivo de rendimientos potenciales y brechas de rendimientos para los principales cultivos, basado en un protocolo transparente, replicable, y con un sólido cimiento de conocimiento agronómico (**Figura 2**). El Atlas es acceso público y la información utilizada para estimar rendimientos potenciales y brechas está disponible para poder replicar los

resultados. Asimismo, todos los métodos y supuestos usados en la construcción del atlas están detallados en el sitio web. El Atlas va a proveer una plataforma que puede ser usada como herramienta por parte de los productores, asesores, agencias de extensión y sectores privados y gubernamentales relacionados con la agro-industria para identificar regiones con mayores oportunidades para incrementar la producción de alimento a través de una intensificación sustentable.

Primeros pasos hacia la construcción de un atlas global de brechas de rendimientos

El Atlas es un proyecto global basado en conocimiento local y requiere de expertos para obtener datos locales confiables de clima, suelo y, especialmente, manejo de cultivo para la estimación de rendimientos potenciales. Los primeros esfuerzos se focalizan en doce países en África (Burkina Faso, Gana, Mali, Marruecos, Níger, Nigeria, Etiopía,

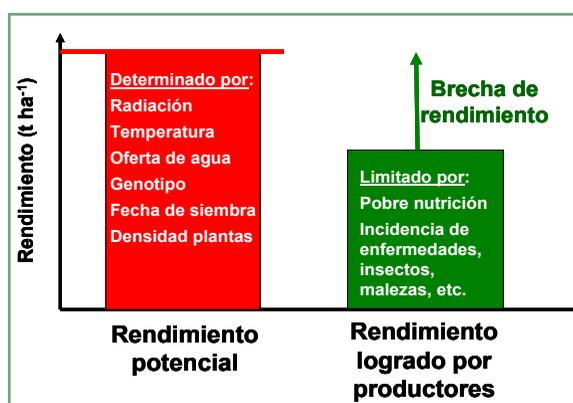


Figura 1. Marco conceptual del Atlas Mundial de Brechas de Rendimiento en el cual hay dos niveles de producción: potencial (izquierda) y logrado por productores (derecha). La diferencia entre estos dos niveles representa la brecha de rendimiento. Adaptado de van Ittersum et al. (2013).

Kenia, Tanzania, Uganda, Túnez y Zambia), tres en Asia (Bangladesh, India y Jordania), Estados Unidos, Australia, Brasil y Argentina (**Figura 2**). Desarrollar el Atlas requiere construir una sólida red de colaboración con expertos en cada uno de estos países. El proyecto se encuentra actualmente financiado por la Fundación Bill and Melinda Gates, el Instituto "Water for Food" de la Universidad de Nebraska y el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). En Argentina, el trabajo está siendo llevado adelante por investigadores del INTA Balcarce/ Universidad de Mar del Plata/CONICET, del Grupo de Estudios Ambientales (CONICET/GEA), del INTA Castelar y de la Facultad de Agronomía de la UBA. La financiación para el proyecto en Argentina proviene del Instituto "Water for Food" de la Universidad de Nebraska (<http://waterforfood.nebraska.edu/>) y también de las instituciones donde trabajan los integrantes del grupo de trabajo.

¿Cómo estimar brechas de rendimientos con relevancia local y regional?

La aproximación usada en el proyecto consiste en la selección de un determinado número de



Figura 2. Portal de acceso al Atlas Mundial de Brechas de Rendimiento (www.yieldgap.org). El Atlas es de acceso público y tiene como objetivo proveer estimaciones de rendimiento potencial y brechas de rendimiento, a nivel local y global, para los principales cultivos extensivos. En la actualidad, los esfuerzos se focalizan en 19 países que se indican, en rojo, en el mapa.

localidades, situadas en zonas relevantes para la producción de cada cultivo, para las cuales se estima el rendimiento potencial utilizando modelos de simulación de cultivo (van Ittersum et al., 2013). Las simulaciones están basadas en datos locales de clima, suelo y manejo de cultivo (fecha de siembra, cultivar, distancia entre hileras, y densidad de plantas). La brecha de rendimiento se calcula como la diferencia entre el rendimiento potencial simulado y el rendimiento logrado por los productores. La estimación de rendimiento potencial y brecha se realiza primero a nivel local y luego se extrapola a nivel de región y país. ¿Cómo se hace esto último?

Los equipos de trabajo de la Universidad de Nebraska y Wageningen han desarrollado un mapa global de zonas climáticas con relevancia agronómica y universal para todos los cultivos (van Wart et al., 2013). En resumen, el mundo fue dividido en celdas de aproximadamente 10 x 10 km y las celdas se agruparon de acuerdo a tres índices climáticos: i) longitud de la estación de crecimiento, ii) grado de limitación hídrica, y iii) estacionalidad (diferencia de temperatura entre estaciones). La **Figura 3** muestra el mapa de zonas climáticas para América del Sur (A) y Argentina (B). Cada color corresponde a una zona climática específica, es decir, a una combinación de longitud de estación de crecimiento, limitación hídrica y estacionalidad. La zona climática define el espacio de extrapolación de una estimación de rendimiento potencial y logrado por el productor.

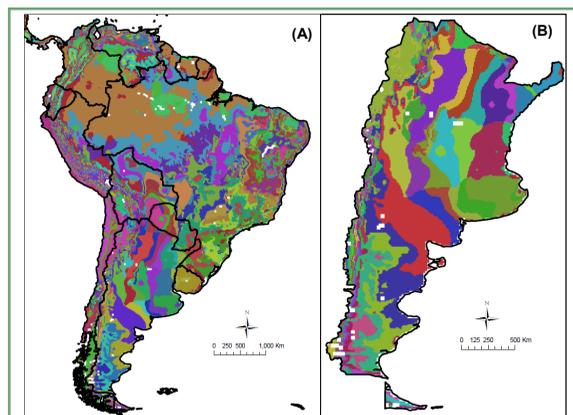


Figura 3. Mapa de zonas climáticas para (A) América del Sur y (B) Argentina. Cada color corresponde a una zona climática diferente. Condiciones climáticas relativamente similares pueden esperarse dentro de la región geográfica que se muestran con el mismo color. Adaptado de van Wart et al. (2013).

Una vez definidas las zonas climáticas, se seleccionan las localidades a simular basado en la distribución del área sembrada con cada cultivo y la ubicación de las estaciones meteorológicas, buscando maximizar el grado de cobertura del área sembrada con cada cultivo. El rendimiento potencial se estima usando modelos de simulación de cultivo que han sido satisfactoriamente evaluados en condiciones de producción que carecen de limitaciones nutricionales y sin incidencia de malezas, plagas y enfermedades. Para cada localidad, se simulan las secuencias de cultivo más frecuentes (en función de la información aportado por expertos locales) y series de suelos dominantes, luego se calcula un promedio ponderado por su representatividad en la zona. Las simulaciones utilizan un mínimo de 20 años de datos climáticos para obtener estimaciones robustas del promedio y su variabilidad. Como se mencionó anteriormente, la brecha de rendimiento se estima como la diferencia entre el rendimiento potencial simulado y el rendimiento logrado por productores. Finalmente, la extrapolación de localidad al nivel región y país se basa en el mapa de zonas climáticas descrito anteriormente.

Desarrollo del Atlas en Argentina

Los esfuerzos iniciales en Argentina se focalizan en estimar rendimientos potenciales y brechas para maíz, soja y trigo en condiciones de secano. Estos tres cultivos cubren más del 80% del área total sembrada con cultivos de grano en Argentina. Siguiendo el protocolo global de trabajo se seleccionaron 15 localidades para las simulaciones de rendimiento (Figura 4). Las zonas climáticas donde se encuentran estas localidades cubren más del 75% del área total sembrada con maíz, trigo y soja en Argentina. Los datos climáticos diarios de los últimos 28 años fueron obtenidos para cada localidad, incluyendo radiación solar, temperatura máxima y mínima y precipitación. Las fuentes de datos climáticos fueron provistas por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA Clima y Agua), el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la base de datos agroclimáticos de NASA-POWER. Los datos climáticos de cada localidad fueron chequeados mediante un control de calidad basado en comparaciones con las tres estaciones meteorológicas adyacentes. Las series de suelos dominantes (2-3 por localidad) en el área cultivada, fueron identificadas mediante el uso de bases de datos de suelo de INTA (geointa.

gov.ar), asistida por opinión experta del equipo de investigadores argentinos y consultas a expertos locales, quienes también fueron consultados para definir los manejos (fecha de siembra, densidad, cultivares) más frecuentes.

Se simularon 28 campañas bajo cada combinación de secuencia de cultivos y tipo de suelo dominantes determinada para cada localidad. Los modelos utilizados fueron CERES-Maize v4.5 (maíz), CERES-Wheat v4.5 (trigo) y CROPGRO v4.5 (soja), los cuales han sido satisfactoriamente evaluados en su capacidad para estimar los rendimientos de los cultivos en Argentina (Mercau et al., 2001, 2007 y Monzón et al., 2007; 2012). El rendimiento potencial promedio, sin limitaciones de nutrientes ni reducciones por adversidades, para cada localidad se calculó ponderando las áreas sembradas en cada suelo bajo las diferentes secuencias de cultivo. La brecha fue estimada como la diferencia entre el rendimiento potencial simulado y el rendimiento logrado por productores. El último se calculó basado en estadísticas de producción de las últimas 6 campañas, reportado por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de la República Argentina, para los departamentos donde se encuentran ubicadas las localidades seleccionadas.

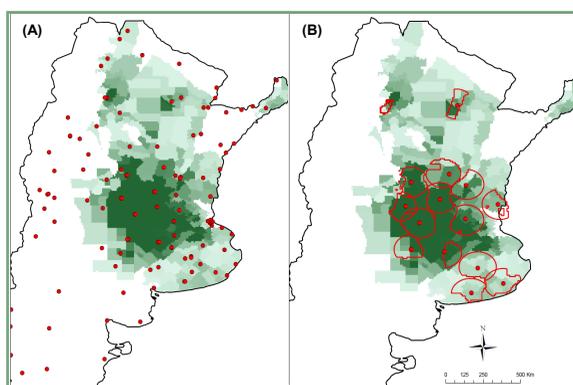


Figura 4. (A) Distribución del área sembrada con maíz en Argentina (en verde) y ubicación de estaciones meteorológicas (círculos rojos) que cuentan con datos climáticos diarios. (B) Localidades seleccionadas para la estimación de rendimiento potencial y brechas de rendimiento. Los polígonos con bordes rojos indican el espacio aproximado de extrapolación de las estimaciones de rendimiento potencial y brecha de rendimiento de cada localidad. Fuente de datos: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de la República Argentina, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

¿Cuánto más soja, trigo y maíz puede producir Argentina?

Los resultados del análisis de brechas de rendimiento en Argentina están disponibles en el sitio web: www.yieldgap.org. La **Figura 5** muestra los resultados para maíz donde se puede observar que la magnitud y la variación del rendimiento potencial, cambia sustancialmente entre localidades (**Figura 5**).

Los rendimientos alcanzables para Argentina (Yw, potencial en secano limitado por agua) fueron de 3.9, 5.2 y 11.6 t ha⁻¹ para soja, trigo y maíz, respectivamente. Las brechas de rendimiento de Argentina fueron de 1.2, 2.2 y 4.8 t ha⁻¹ para soja, trigo y maíz, respectivamente. Expresados como porcentaje de Yw, la brecha de rendimiento fue considerablemente menor en soja (31%), que en trigo y maíz (41%), esta diferencia fue consistente a través de todas las regiones. Identificamos una alta variabilidad en las brechas de rendimiento entre las regiones que, en combinación con la amplia gama de clima, suelos y sistemas de cultivo, hace de Argentina un interesante caso de estudio para avanzar en la comprensión de las causas de las brechas de rendimiento.

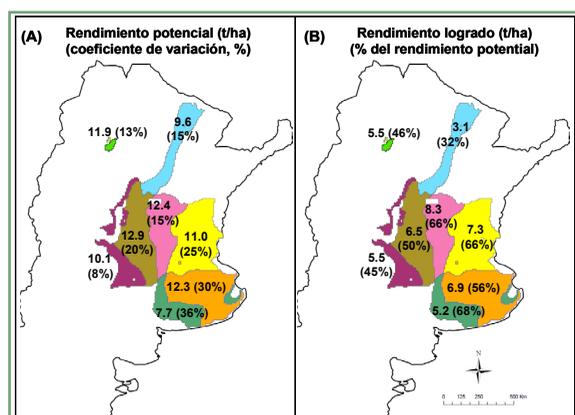


Figura 5. Mapa de Argentina indicando las zonas climáticas relevantes para la producción de maíz. En (A) los números indican el rendimiento potencial en secano promedio de 28 campañas (en t/ha) y su variabilidad, expresada como coeficiente de variación (%), en paréntesis). En (B) los números indican el rendimiento logrado por productores (en t/ha) promedio de las últimas 6 campañas y el porcentaje del rendimiento logrado con respecto al rendimiento potencial estimado (en paréntesis). Fuente de datos de rendimientos logrados: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de la República Argentina (<http://www.siaa.gov.ar/index.php/series-por-tema/agricultura>)

Nuestro análisis ha demostrado que la Argentina tiene un gran potencial para el aumento de la producción agrícola mediante el cierre de las brechas de rendimiento existentes, ya que los rendimientos reales son significativamente más bajos que el rendimiento alcanzable. Teniendo en cuenta un rendimiento alcanzable igual al 80% del Yw y la tecnología actual, Argentina sería capaz de producir 54,6 millones de toneladas de soja, 18.9 millones de t de trigo y 34.3 millones de toneladas de maíz, teniendo en cuenta el área de cultivo de la campaña 2011/12 de cultivo, en lugar de la ca. 48, 14 y 23 millones de t que estaba produciendo. Esto representaría un incremento, del 7.2%, 3.3% y 10.3% de las exportaciones de soja, trigo y maíz para el año 2012.

Agradecimientos

Agradecemos a Agustín Giorno (AACREA), Alberto Quiroga (INTA), Eduardo Martínez Quiroga (AACREA), Fernando Ross (INTA), Juan Martín Capelle (AACREA), Lía Olmedo Pico (INTA), Martín Sánchez (AACREA), Octavio Caviglia (INTA), y Pablo Calviño (AACREA) por su ayuda en la determinación de prácticas de manejo en las localidades seleccionadas.

Bibliografía

Mercau, J.L., E.H. Satorre, M.E. Otegui, G.A. Maddonni, J. Cárcova, R. Ruiz, M. Uribelarrea, y F.J. Menendez. 2001. Evaluación a campo del comportamiento del modelo Ceres en cultivos de maíz del norte de la provincia de Buenos Aires. VII Congreso Nacional de Maíz.

Mercau, J.L., J. Dardanelli, D. Collino, J. Andriani, A. Irigoyen, y E.H. Satorre. 2007. Using CROPGRO model to predict on-farm soybean yields in the Pampas. *Field Crops Res.* 100: 200-209.

Monzon, J.P., V.O. Sadras, P.A. Abbate, y O.P. Caviglia. 2007. Modelling management strategies for wheat-soybean cropping systems in the Southern Pampas. *Field Crops Res.* 101:44-52.

Monzon, J.P., V.O. Sadras, y F.H. Andrade. 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.

Grassini, P., J. Thorburn, C. Burr, y K.G. Cassman. 2011. High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn-Belt: I. On-farm yield, yield-potential, and impact of management practices. *Field Crops Res.* 120:142-150.

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 Res.* 143:4-17

Van Wart, J., L. Van Bussel, J. Wolf, R. Licker, P. Grassini, A. Nelson, H. Boogaard, J. Gerber, N.D. Mueller, L. Claessens, K.G. Cassman, y M.K. Van Ittersum. 2013. Reviewing the use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. *Field Crops Res.* 143:44-55.

[volver al índice](#)

Manejo nutricional eficiente para maximizar la producción de los cultivos

Gabriel P. Espósito¹, Cecilia Cerliani¹ y Guillermo Balboa¹

¹Universidad Nacional de Río Cuarto

*Contacto: gesposito@ayv.unrc.edu.ar

Introducción

La población mundial alcanzará los 9100 millones de habitantes alrededor del 2050, lo cual representa un incremento del 34% de la población actual, con una acelerada concentración en los grandes conglomerados urbanos, que implicará familias más dependientes de comprar alimentos que de producirlos en su hogar. En este sentido, FAO estima que es necesario incrementar en un 60% la producción agrícola global (cerca de un 77% en los países en desarrollo) hacia el 2050 para alcanzar la oferta de 3070 kcal por habitante por día, lo cual se traduce en un requerimiento de 940 millones de toneladas de cereales y 200 millones de toneladas de carne para ese año (OECD-FAO, 2012).

Este aumento de la producción mundial puede obtenerse básicamente a través del incremento en el rendimiento de los cultivos puesto que la superficie agrícola se puede expandir escasamente. Bruinsma (2009) estima que los incrementos en los rendimientos por unidad de superficie aportarán cerca del 80% del aumento requerido en producción agrícola para el 2050.

Los rendimientos de los cultivos pueden aumentar por incrementos en los rendimientos potenciales o por el cierre de la brecha entre los rendimientos reales y los potenciales (Huang et al., 2002).

Rendimiento potencial y brechas de rendimiento

Se entiende por rendimiento potencial a aquel que ha sido obtenido para una genética específica cuando esta especie crece en un ambiente al cual está adaptado; sin limitaciones de agua y nutrientes; y sin incidencia de malezas, insectos, y patógenos (Evans y Fischer, 1999). En las últimas décadas los rendimientos potenciales han crecido a tasa constantes en las principales regiones agrícolas del mundo (Fischer y Edmeades, 2010).

Por otro lado, las brechas entre los rendimientos

potenciales y reales pueden reducirse mediante técnicas de manejo como el uso de fertilizantes, agroquímicos, riego, mecanización, adaptación de los cultivos a los ambientes de producción, etc.

En maíz, Espósito et al. (2015) establecieron que el rendimiento potencial para el sur de Córdoba con híbridos comerciales fue de 18.75 t ha⁻¹ con extremos entre 16.30 y 22.37 t ha⁻¹. Estos autores encontraron que bajo estas condiciones, el rendimiento potencial de maíz se incrementó linealmente con aumentos en la radiación solar global registrada entre el 1 de diciembre y el 20 de enero de cada campaña. Considerando las 6.54 t ha⁻¹ obtenidas en promedio en Córdoba durante las mismas campañas, se establece una brecha de 12.21 t ha⁻¹ es decir los productores logran sólo un 35% de la producción potencial.

Este tipo de análisis ha sido realizado para otros cultivos en diversas regiones como puede observarse en maíz (Grassini et al., 2009), trigo (Peltonen-Sainio et al., 2009), arroz (Timsina et al., 2010), soja (Specht et al., 1999), etc.

Es ampliamente aceptado que la principal causa de las brechas de rendimientos es la disponibilidad hídrica y nutricional como lo demuestra la revisión realizada por Van Ittersum et al. (2013).

Variabilidad temporal y espacial del rendimiento

En la mayoría de las regiones agrícolas de Argentina, la oferta hídrica de cada año en particular no sólo determina el rendimiento de los cultivos, sino que además define la interacción entre la producción y la respuesta a la fertilización. En años secos, la respuesta en rendimiento al agregado de nitrógeno (N) es baja o nula, mientras que en años húmedos se obtienen las mayores producciones por fertilización nitrogenada (Espósito et al., 2006).

A esta variabilidad temporal en la oferta de recursos, debe agregarse la variabilidad espacial de agua y nutrientes. lo cual puede explicar grandes variaciones del rendimiento dentro de cada lote de producción.

En algunas regiones, el relieve explica claramente el flujo superficial del agua y con ello la variabilidad espacial de su oferta, en otras en cambio, es la profundidad de capas compactadas, horizontes de suelos arcillosos, muy densificados o toscas que definen la profundidad efectiva del suelo y con ello la oferta hídrica. A su vez, la presencia de la napa freática y su calidad también explican la variabilidad. Por ello es necesario conocer las causas de la variabilidad espacial de cada región para poder manejar correctamente la producción de los cultivos (Espósito, 2014).

En este sentido, Ross (2012) estableció que la variabilidad espacial del rendimiento de maíz en el sur de Buenos Aires depende fuertemente de la profundidad del horizonte calcáreo (tosca), el cual está estrechamente asociado a la disponibilidad hídrica del perfil. Esta variabilidad también fue asociada con la respuesta a la aplicación variable de N en trigo (Peralta et al., 2015).

Para manejar esta variabilidad espacial se han desarrollado técnicas de delimitación de zonas de manejo homogéneas (ZM) dentro de los lotes de producción. Para ello, es necesario comprender las causas que provocan diferencias productivas espaciales, de origen natural o antrópico y que generalmente se asocian a cambios en la oferta de recursos (agua, espacio físico, aire, nutrientes, etc.) que alteran el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Una vez que se han establecido las ZM, se debe evaluar la conveniencia agronómica y económica de practicar manejo variable, como ser: cambiar espacialmente fecha de siembra, genética, densidad, nutrición, manejo sanitario, etc. En este sentido se ha evaluado el efecto de estas técnicas en el sur de Córdoba indicando que el mayor impacto productivo y económico de considerar las ZM se centra en la densidad de siembra y en la fertilización variable. En general, en siembras tempranas es conveniente variar la densidad mientras que en siembras tardías es menos frecuente su conveniencia (Martínez Bologna et al., 2014).

Manejo nutricional eficiente

Mediante la optimización económica por funciones de producción se puede establecer la dosis óptima económica de N (DOEN) por zonas de manejo. Estas funciones normalmente se determinan al momento de la cosecha de los cultivos mediante mapas de rendimiento y son establecidas por estadística espacial. Estas tienen una

gran dependencia con las condiciones climáticas reinantes durante el ciclo del cultivo. Para incluir este efecto climático sobre la función de producción del maíz según fertilización nitrogenada, Espósito (2013), propuso diferentes ecuaciones según sean años secos, normales y húmedos. A partir de las mismas se puede interpretar que a medida que aumenta la disponibilidad hídrica aumenta la respuesta lineal al N y cambia la interacción entre el índice topográfico compuesto (CTI) y el N. Esto implica que en años secos convendría fertilizar con mayor dosis los sitios con alto CTI (receptores de agua), mientras que en años normales y húmedos ocurre lo contrario. Este método presentó una eficiencia agronómica en el uso del N superior en un 48% a la variación de N por ZM (Balboa et al., 2014).

Este método de diagnóstico de la fertilización nitrogenada en maíz, fue generado a partir de la evaluación de 18 experimentos realizados entre 1998 y 2011 en diferentes localidades de Córdoba, permite generar, para una relación precios (costo del N/precio del maíz) determinada, diferentes mapas de fertilización según la oferta hídrica esperada en cada campaña, de acuerdo al pronóstico climático.

La fecha de siembra del maíz también incide sobre la DOEN, Espósito et al. (2012a) encontraron que la DOEN en los maíces denominados tardíos (fecha de siembra de principios de diciembre) fue menor (entre 50 y 80 kg N ha⁻¹) que en los de siembra temprana (fines de septiembre). Además, estos autores hallaron que la dosis variable de N se justificó económica y estadísticamente en siembras tempranas y no en siembras tardías.

A modo de síntesis, la fertilización se puede variar espacialmente mediante dos criterios, el criterio de variar la dosis en forma discreta por ZM o hacerlo en forma continua, tal es el caso del manejo del N, a través de los atributos de terreno (AT). En forma discreta, en algunos lotes es conveniente variar la dosis de P o Zn, manteniendo el concepto de umbrales críticos (18 y 1 mg kg⁻¹, respectivamente). En cambio ha sido demostrado que el manejo variable del N en el oeste de Córdoba es conveniente bajo el criterio continuo y según el pronóstico climático (húmedo, normal o seco) y el índice topográfico compuesto como variable espacial íntimamente relacionada con la dosis óptima económica de N (Balboa et al., 2014).

Micronutrientes

Entre los principales micronutrientes a utilizar en los cultivos extensivos en la región pampeana se destaca el Zn. En maíz, Espósito et al. (2010) sobre un suelo con 0.33 mg kg^{-1} de Zn encontraron respuestas al agregado de este micronutriente mediante fertilización, logrando el máximo rendimiento con $2.36 \text{ kg Zn ha}^{-1}$, aunque la respuesta no fue significativa a dosis mayores a 1.5 kg ha^{-1} . Esta tendencia se repitió en numerosos ensayos realizados durante diversas campañas y por varios autores, permitiendo concluir que para el cultivo de maíz, cuando el nivel de Zn se encuentra debajo del umbral crítico (1 mg kg^{-1}), la dosis de 1.5 kg ha^{-1} es la indicada para lograr los máximos rendimientos.

En cuanto al momento de aplicación, la misma puede realizarse mediante voleo anticipado, al momento de la siembra incorporado al suelo, o bien en estadios iniciales del cultivo y hasta V6. Se pueden emplear, según el momento de fertilización, fuentes líquidas, sólidas, curasemillas o fertilizantes foliares.

Considerando que existe antagonismo entre el P y el Zn, se destaca que la eficiencia agronómica en el uso del P del fertilizante (EAP) se puede mejorar cuando se realiza de manera conjunta con la fertilización con Zn. En este sentido se han reportado incrementos de hasta un 56.6% como consecuencia de haber incorporado Zn al fertilizante (Espósito et al., 2014). Una situación similar fue hallada en relación a la eficiencia en el uso del N, donde en promedio de cinco ensayos la misma aumentó de 12.38 a $18.62 \text{ kg grano kg N}^{-1}$ en los tratamientos sin y con Zn, respectivamente, es decir un 50.4%.

Este cambio en la eficiencia en el uso de los nutrientes evidencia una vez más la conveniencia de la fertilización balanceada de los cultivos sobre la producción de granos, demostrando que deben realizarse adecuados diagnósticos para potenciar la producción de granos minimizando el impacto ambiental de la técnica. A modo de ejemplo, se cita un experimento donde la fertilización con N representó una eficiencia agronómica del N (EAN) de 18.43 kg kg^{-1} , el tratamiento con NS incrementó la EAN a 21.48 kg kg^{-1} y el NSZn presentó el valor superior de 24.33 kg kg^{-1} .

Manejo integrado

Para evaluar un manejo integrado de la ferti-

lización optimizada por ambientes que permita acortar las brechas de rendimiento se realizó un experimento en el cual se comparó la fertilización variable con similar dosis aplicada en forma uniforme y con la dosis normalmente utilizada por el productor con aplicación uniforme.

Para ello, se seleccionó un lote comercial de producción de un establecimiento de la zona rural de Las Vertientes (Río Cuarto, Córdoba), el cual contaba con varios mapas de rendimiento de años anteriores y altimetría de precisión. A partir de esta información se procedió a zonificar el lote en ambientes y se determinó el índice topográfico compuesto (CTI). El estudio se realizó para maíz temprano (siembra de septiembre) y tardío (siembra de diciembre) implantados en el mismo lote durante la campaña 2012/13.

El manejo variable se realizó modificando la densidad de siembra y la fertilización de arranque con NPS por ZM, en la ZM baja producción (BP) se utilizaron $60\,000$ semillas ha^{-1} y 40 kg P ha^{-1} , mientras que en la ZM alta producción (AP) se sembraron $80\,000$ semillas ha^{-1} y 30 kg P ha^{-1} . A partir del mapa de CTI y según Espósito (2013), se aplicaron las dosis de N variables espacialmente, las cuales oscilaron entre 33 y 86 kg N ha^{-1} . El manejo promedio consistió en la aplicación de la dosis media ponderada por ZM de plantas, P y N.

Los resultados encontrados indicaron mejoras en la producción de maíz, principalmente en la ZM AP, alcanzando en la siembra temprana los $13\,435 \text{ kg ha}^{-1}$ en el tratamiento de manejo variable de densidad, P y N en comparación con los $12\,647 \text{ kg ha}^{-1}$ del tratamiento promedio uniforme y los $10\,139 \text{ kg ha}^{-1}$ de la dosis productor uniforme.

Estas diferencias productivas entre tratamientos permitieron interpretar que en siembras tempranas la EAN y la EAP fueron un 28.41 y 33.09% superior cuando se varió espacialmente la densidad, el P y el N. En cambio estas ventajas se redujeron en la siembra tardía con diferencias del 11.35 y 14.97%, para EAN y EAP, respectivamente.

Los resultados encontrados en la implementación de estrategias productivas a escala sitio específico, permiten concluir que se han desarrollado técnicas de manejo variable de insumos y fertilizantes que han mostrado un desempeño aceptable y ventajas productivas y económicas respecto a la aplicación uniforme. De esta manera se puede aplicar un "Manejo nutricional eficiente para maximizar la producción de los cultivos".

Bibliografía

- Andrade, F.** 2011. La tecnología y la producción agrícola. El pasado y los actuales desafíos. EEA Balcarce, Centro Regional Buenos Aires Sur. Ediciones INTA, 42 pp.
- Balboa, G., G. Espósito, C. Cerliani, e I. Ciampitti.** 2014. Site-Specific Variable Nitrogen Rate Model in Corn. ASA, CSSA & SSSA International Annual Meeting. Long Beach, CA.: 227-2.
- Bruinsma, J.** 2009. The Resource Outlook to 2050: By how much do land, water, and crop yields need to increase by 2050? Paper presented at the FAO Expert Meeting, 24-26 June 2009, Rome on "How to Feed the World in 2050".
- Espósito, G., G. Balboa, C. Cerliani, y R. Balboa.** 2015. Rendimiento potencial de maíz. En: El cultivo de maíz en San Luis. Capítulo 2:32-52. INTA Argentina.
- Espósito, G., G. Balboa, C. Cerliani, y R. Balboa.** 2014. Eficiencia agronómica del fósforo en maíz afectada por la fertilización con zinc. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca. Buenos Aires. Argentina.
- Espósito, G.** 2014. Agricultura según ambientes: Herramientas para su implementación. X Congreso Nacional de maíz. Resúmenes de Conferencias. Rosario (Santa Fé, Argentina): 27-28.
- Espósito, G.** 2013. Análisis de la variabilidad espacio-temporal de la respuesta al nitrógeno en maíz mediante un modelo econométrico mixto espacial (MEME). Tesis para la obtención del Doctorado en Ciencias Agropecuarias de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Córdoba.:108pp.
- Espósito G., G. Balboa, C. Castillo, R. Balboa, y A. Degioanni.** 2012. Fecha de siembra y fertilización variable de maíz sobre Haplustoles de Córdoba. XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino y Latino Americano de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata. Buenos Aires. Argentina.
- Espósito, G., G. Balboa, C. Castillo, y R. Balboa.** 2010. Disponibilidad de zinc y respuesta a la fertilización del maíz en el sur de Córdoba. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario. Santa Fe. Argentina.
- Espósito, G., C. Castillo, y R. Balboa.** 2006. Calibración y validación de un método de diagnóstico de fertilización nitrogenada en maíz para el sur de Córdoba (Argentina). Revista de Investigación Agraria. RIA, 35(3):45-63. INTA Argentina.
- Evans, L. T., y R. A. Fischer.** 1999. Yield Potential: Its Definition, Measurement, and Significance. Crop Sci. Vol. 39 No. 6, p. 1544-1551. doi:10.2135/cropsci1999.3961544x
- Fischer, R. A., y G. Edmeades.** 2010. Breeding and cereal yield progress. Crop Sci 50: 585-598.
- Grassini, P., H. Yang, y K. G. Cassman.** 2009. Limits to maize productivity in Western Corn-Belt: A simulation analysis for fully irrigated and rainfed conditions. Agric. and For. Meteor. 149, 1254-1265.
- Huang, J., C. Pray, y S. Rozelle.** 2002. Enhancing the crops to feed the poor. Nature 418: 678-684.
- Martínez Bologna, G., S. Castro, C. Cerliani, G. Balboa, R. Naville y G. Espósito.** 2014. Densidad de siembra de maíz asociada a la variabilidad espacial del suelo. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca, Argentina.
- OECD-FAO.** 2012. **Agricultural Outlook 2012**, OECD Publishing. doi: 10.1787/agr_outlook-2012-en.
- Peltonen-Sainio, P., L. Jauhiainen, e I. P. Laurila.** 2009. Cereal yield trends in northern European conditions: Changes in yield potential and its realization. Field Crops Research 110, 85-90.
- Peralta, N., J. Costa, M. Balzarini, M. Castro Franco, M. Córdoba, y D. Bullock.** 2015. Delineation of management zones to improve nitrogen management of wheat. Computers and Electronics in Agriculture 110.:103-113.
- Ross, F.** 2012. Densidad de plantas en maíz: ajuste por ambiente. Informaciones agronómicas de Hispanoamérica. International Plant Nutrition Institute. 8:11-14.
- Specht, J. E., D. J. Hume, y S. V. Kumudini.** 1999. Soybean Yield Potential--A Genetic and Physiological Perspective. Crop Sci 39, 1560-1570.
- Timsina, J., M. Jat, y K. Majumdar.** 2010. Rice-maize systems of South Asia: current status, future prospects and research priorities for nutrient management. Plant and Soil 335, 65-82.
- Van Ittersum, M. K., K. G. Cassman, P. Grassini, J. Wolf, P. Tittone, y Z. Hochman.** 2013. Yield gap analysis with local to global relevance—A review. Field Crops Research 143.: 4-17. ■

[volver al índice](#)

Aportes de la ecofisiología en el manejo, nutrición y mejoramiento de cultivos

Lucas Borrás

Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario

*Contacto: lborras@unr.edu.ar

Aporte de marcos conceptuales para la generación del rendimiento

La ecofisiología provee marcos teóricos útiles para entender las causas de las variaciones en los rendimientos de los cultivos. Estos marcos teóricos nos permiten identificar qué procesos fisiológicos se deberían incrementar para lograr aumentos en los rendimientos. Antes de discutir esos procesos y, frente a la pregunta sobre cómo podemos aumentar los rendimientos de maíz, soja, o cualquier cultivo extensivo, resulta útil definir las diferentes formas que existen de entender el rendimiento.

Utilizando un esquema conceptual clásico desarrollado por Rabbinge (1993) se puede definir al rendimiento potencial como aquel que se logra en condiciones no limitantes de agua ni nutrientes (Figura 1). En este caso, el rendimiento potencial depende de la radiación incidente durante el ciclo del cultivo y de la temperatura, ambos considerados factores definitorios del rendimiento. Desde el punto de vista del productor, el rendimiento potencial se define mediante prácticas de manejo tales como la elección de la fecha de siembra, el grupo de madurez del cultivar sembrado, la latitud donde se encuentra el lote de producción y la estructura del canopeo establecida mediante la elección del espaciamiento y la densidad de siembra lograda.

Los factores limitantes del crecimiento comprenden a recursos esenciales como el agua, nutrientes y radiación. Cuando su oferta es limitada determinan que el rendimiento del cultivo sea menor al potencial definido por las prácticas arriba mencionadas. Este es el rendimiento alcanzable (Figura 1). Por último, el rendimiento logrado es el que finalmente el productor cosecha, y depende también de la incidencia de factores reductores del rendimiento debido principalmente a factores bióticos (plagas, enfermedades, malezas), aunque algunos factores abióticos como el granizo también pueden incidir. Frente a estos factores limitantes y reductores existen prácticas de manejo de aumento de rendimiento y de protección del rendimiento, respectivamente (Figura 1).

Desde la ecofisiología, variaciones en rendimiento (ya sea potencial, alcanzable o logrado) pueden explicarse con diferentes marcos teóri-

cos. La elección acerca de cuál marco teórico es el más adecuado dependerá del factor del ambiente (ej., radiación, agua o nutrientes) más limitante (o definitorio) para el rendimiento. En situaciones normales de la región pampeana húmeda (ej., sin sequías extremas), el rendimiento suele explicarse en función de la radiación como insumo limitante, donde:

$$\text{Rendimiento (kg ha}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Rad}_{\text{inc}} \text{ (Mj m}^{-2} \text{ s}^{-1}\text{)} \times \text{Ef}_{\text{int}} \text{ (\%)} \times \text{EUR (kg Mj}^{-1}\text{)} \times \text{IC (\%)}}{\text{EUR (kg Mj}^{-1}\text{)} \times \text{IC (\%)}}$$

Rad_{inc} es la radiación incidente durante el ciclo del cultivo; Ef_{int} es la eficiencia con la que el cultivo intercepta la radiación incidente; EUR es la cantidad de biomasa que el cultivo produce por unidad de radiación efectivamente captada por el mismo; e IC es el índice de cosecha, la proporción de granos respecto a la biomasa total del cultivo.

Aportes al manejo, nutrición y mejoramiento de los cultivos

Gracias a la existencia de marcos teóricos con utilidad práctica, la incidencia de prácticas de manejo como ser elección de genotipo, fecha de siembra, densidad de siembra, manejo de fertilizantes, riego, y otros, pueden ser evaluados y testeados en forma teórica antes de su implementación. De esa forma se puede entender el

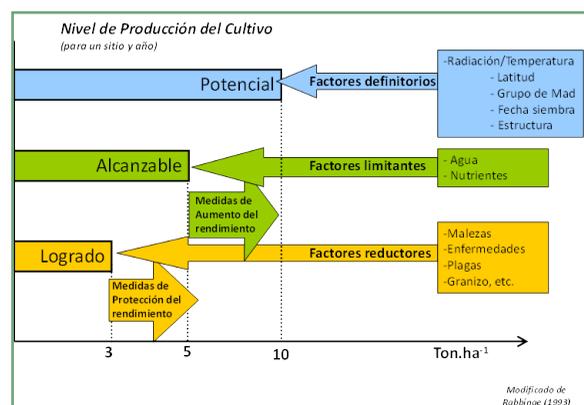


Figura 1. Factores definitorios, limitantes y reductores del rendimiento potencial de un cultivo.

posible impacto de una determinada práctica de manejo sobre el rendimiento del cultivo.

A pesar de esta primera aproximación existe la necesidad de determinar la mejor combinación de prácticas de manejo en forma empírica, y surge de estudios a campo. Aquí la eco-fisiología sirve en gran parte para luego entender los mecanismos involucrados en la generación de las combinaciones más exitosas. Hay que entender que existe la necesidad de determinar para cada ambiente el impacto en rendimiento que cada práctica de manejo tiene, y explotar luego las mejores combinaciones. Los modelos eco-fisiológicos son simplificaciones de la realidad, donde detalles que impactan en el rendimiento final pueden no estar contemplados. Y muchas veces las mejores combinaciones actúan sinérgicamente, un ejemplo es el uso de genotipos de maíz de alto potencial de rendimiento y su mayor respuesta a nitrógeno (DAndrea et al., 2006; Ciampitti y Vynn, 2013).

Si bien la eco-fisiología de cultivos ha tradicionalmente ayudado a entender el resultado observado a campo a posteriori, esto está siendo modificado. Un clásico ejemplo de este caso es la descripción de los cambios observados en genotipos modernos producto del mejoramiento en el cultivo de maíz. Los mejoradores seleccionan por rendimiento y los eco-fisiólogos han descrito a posteriori los atributos que en forma indirecta condujeron a los genotipos modernos a tener rendimientos más altos que los genotipos antiguos (Duvick et al., 2004; Echarte et al., 2004). En la actualidad existe la posibilidad de que esta dinámica se modifique, principalmente gracias al uso de marcadores moleculares de ADN en programas de mejoramiento. Actualmente si se determina un atributo que fue (o es) de utilidad se lo puede seleccionar en forma simple mediante la determinación de qué alelos hay que seleccionar, y avanzarlo dentro de un programa de mejora sin la necesidad de realizar mediciones del carácter específico en forma directa en todo el programa de mejoramiento (Messina et al., 2011). Aquí la ecofisiología de cultivos está cumpliendo un rol clave en ayudar a generar protocolos de medición de atributos complejos a campo.

Lamentablemente, la eco-fisiología muestra muchas veces que los mecanismos detrás de determinadas respuestas del cultivo no son simples, y por ende de difícil aplicación práctica en programas de mejoramiento o esquemas de manejo de cultivos. En maíz se reconoce que los genotipos comerciales argentinos actuales deben ser sembrados cada uno a una densidad óptima diferente incluso en

un mismo índice ambiental (Sarlangue et al., 2007; Hernández et al., 2014). Esto ha generado la necesidad desde los proveedores de germoplasma de diseñar experimentos para determinar cual es el manejo óptimo de cada genotipo en cada condición ambiental. Estudios eco-fisiológicos específicos han demostrado que los mecanismos de tolerancia a alta densidad de los genotipos comerciales actuales son muy diferentes, lo que dificulta la capacidad de realizar generalizaciones. Algunos genotipos toleran la alta densidad producto de mantener el crecimiento de las plantas ante condiciones de stress, mientras que otros genotipos tienen una partición de biomasa durante la floración muy eficiente (Hernández et al., 2014).

En la actualidad el grupo de trabajo dentro de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Rosario está involucrado en diferentes estudios relacionados a lo que se menciona líneas arriba. Específicamente ha estado trabajando en: i) entender cuáles son las prácticas de manejo que dan mayores rendimientos, y cuales prácticas generan sinergismos positivos; ii) estudiar qué atributos tienen los genotipos comerciales más exitosos en términos de rendimiento, en tolerancia a stress por densidad o falta de agua, o en calidad de grano; y iii) en la generación de protocolos para determinados atributos del cultivo que se relacionan con la determinación del rendimiento y permiten la determinación de las bases genéticas (marcadores de ADN).

Bibliografía

- Ciampitti, I.A., y T. Vynn.** 2013. Grain Nitrogen Source Changes over Time in Maize: A Review. *Crop Sci.* 53, 366-377.
- DAndrea, K., M.E. Otegui, y A. Cirilo.,** 2008. Kernel number determination differs among maize hybrids in response to nitrogen. *Field Crops Res.* 205, 228-239.
- Duvick, D.N., J.S.C. Smith, y M. Cooper.** 2004. Long-term selection in a commercial hybrid maize breeding program. *Plant Breed. Rev.* 24, 109-151.
- Echarte, L., F.H. Andrade, C.R.C. Vega, y M. Tollenaar.** 2004. Kernel number determination in Argentinean maize hybrids released between 1965 and 1993. *Crop Sci.* 44, 1654-1661.
- Hernández, F., A. Amelong, y L. Borrás.** 2014. Genotypic Differences among Argentinean Maize Hybrids in Yield Response to Stand Density. *Agronomy Journal* 106, 2316-2324
- Messina, C.D., D. Podlich, Z.S. Dong, M. Samples, y M. Cooper.** 2011. Yield-trait performance landscapes: from theory to application in breeding maize for drought tolerance. *J. Exp. Botany* 62, 855-868.
- Rabbinge, R.** 1993. The Ecological Background in Food Production. En *Crop Protection and Sustainable Agriculture*, editado por D. J. Chadwick & J. Marsh. John Wiley and Sons.
- Sarlangue, T., F.H. Andrade, P.A. Calviño, y L.C. Purcell.** 2007. Why do maize hybrids respond differently to variations in plant density? *Agron. J.* 99, 984-991.

[volver al índice](#)

Pérdida de nutrientes desde agrosistemas y su destino en el ambiente

M. Carolina Sasal¹; Marcelo G. Wilson^{1,3}; José D. Oszust³; Emmanuel A. Gabioud¹; Silvana M.J. Sione³; María L. Darder²
y María J. Torti²

¹ INTA EEA Paraná

² INTA EEA Pergamino

³ FCA- UNER

*Contacto: sasal.maria@inta.gob.ar

Introducción

La producción agropecuaria integra acciones sobre los recursos naturales (agua, aire, suelo, biodiversidad) para la generación de alimentos. El aumento demográfico y de consumo de alimentos originados por el incremento del ingreso y la tasa de urbanización, la expansión de los biocombustibles y la mayor frecuencia de las perturbaciones causadas por fenómenos meteorológicos, son fuerzas impulsoras de políticas y decisiones económicas, comerciales y sociales en el contexto actual (FAO, 2011). Si bien los incrementos en la producción agropecuaria constituyen oportunidades de desarrollo económico, implican necesariamente una mayor presión sobre el ambiente (Matlock y Morgan, 2011).

La acumulación de las distintas formas de nitrógeno (N) y fósforo (P) en los diferentes componentes ambientales genera efectos significativos en los ecosistemas y en la sociedad. Entre los efectos positivos podemos mencionar el aumento en la productividad de ecosistemas naturales y en el rendimiento y calidad nutricional de los cultivos, en tanto que la eutrofización, la pérdida de biodiversidad en ecosistemas acuáticos y la contaminación de aguas superficiales y subterráneas constituyen ejemplos de efectos no deseados sobre los ecosistemas (Portela et al., 2006).

Para que exista riesgo de contaminación ambiental, es necesario un sistema de producción que tenga fugas o pérdidas de contaminantes y un medio receptor vulnerable. Sin embargo, su cuantificación y control son muy complejos ya que deben contemplarse aspectos climáticos, edáficos, fisiográficos, hidrográficos, ecológicos, sociales y agro-económicos. Aceptar la complejidad, marca una nueva forma de comprender la realidad y, por ende, un cambio en la manera de interpretar la dinámica de los agroecosistemas, los problemas

que se generan, así como también la búsqueda de soluciones (Arana, 2007). A esto se suma que las decisiones de gestión agropecuaria se toman a una escala de tiempo y espacio mucho menor que la escala en la que se verifican alteraciones mensurables en la capacidad productiva y en la calidad del ambiente.

En diversas zonas agrícolas del mundo, la utilización de fertilizantes y enmiendas orgánicas (compost, estiércol) constituyen causas de acumulación de nutrientes en aguas superficiales y subterráneas (Andriulo et al., 2000). Si bien en Argentina los agroquímicos de mayor volumen de uso son los fertilizantes nitrogenados y fosforados, su utilización no es suficiente para reponer al suelo el N y P exportados en los productos cosechados (Álvarez y Steinbach, 2006). En efecto, este balance negativo de nutrientes constituye uno de los problemas de degradación de suelos más relevantes en el país. Por esto, en nuestro caso cobran relevancia en el análisis otros orígenes de nutrientes en el agua como: la mineralización de la materia orgánica el suelo, la falta de sincronía entre oferta y demanda por parte de los cultivos, el aporte de zonas urbanas o industriales (efluentes cloacales e industriales) y también de producciones animales en confinamiento. Esto hace que la estimación de riesgo de contaminación sea compleja, lo que provoca dificultades a la hora de generar estrategias de manejo que minimicen las pérdidas (Rimski-Korsakov et al 2009)

El objetivo de este trabajo fue evaluar diferentes prácticas agronómicas como fuente no puntual de contaminación de cuerpos de agua y, analizar las pérdidas de N y P provenientes de agrosistemas y su destino en el ambiente, a diferentes escalas (regional, cuenca, parcela y microparcela).

Escala Regional. Provincia de Entre Ríos

Las características naturales de topografía ondulada de la provincia de Entre Ríos, sumado a la baja capacidad de infiltración de sus suelos y la intensidad de las precipitaciones en primavera-verano-otoño, predisponen a gran parte de la superficie provincial a procesos de degradación de suelos, especialmente por erosión hídrica (Scotta y Paparotti, 1990), a la vez que son causas de riesgo de contaminación de los cursos de agua superficiales por escurrimiento (Sasal et al., 2010). Sin embargo, la información provincial sobre la contribución de agroquímicos hacia el agua, al presente, es escasa y dispersa.

Se llevó adelante un relevamiento a escala regional, de diversos cursos de agua superficial (ríos, arroyos, tajamares, lagunas) de la provincia de Entre Ríos. A tal efecto se conformó una red de monitoreo de calidad de aguas (RMCA). La red de monitoreo está integrada por 70 miembros, que representa un grupo de intereses en común, inclu-

yendo productores agropecuarios, profesionales de la agronomía y organismos gubernamentales preocupados por el impacto de los agroquímicos sobre el ambiente. La estructura de participación en red permite absorber el costo de movilización hacia los sitios de muestreo, que representa uno de los principales costos en un programa de monitoreo provincial. Por su parte el INTA tiene a su cargo los análisis de N y P.

El seguimiento de la calidad del agua en cursos superficiales se efectuó en 2012/2013, en tres períodos. Sobre el total de muestras extraídas, se determinó la concentración de nitrógeno (N-nitrato) y fósforo (P). Los valores de concentración fueron categorizados en rangos, en función de los límites de nutrientes tolerados en agua de bebida y los umbrales de eutrofización correspondientes. Los rangos determinados fueron:

Para N-nitrato:

- < 1.5 ppm (umbral de eutrofización)
- 1.5 – 10 ppm
- > 10 ppm (límite tolerado en agua para bebida)

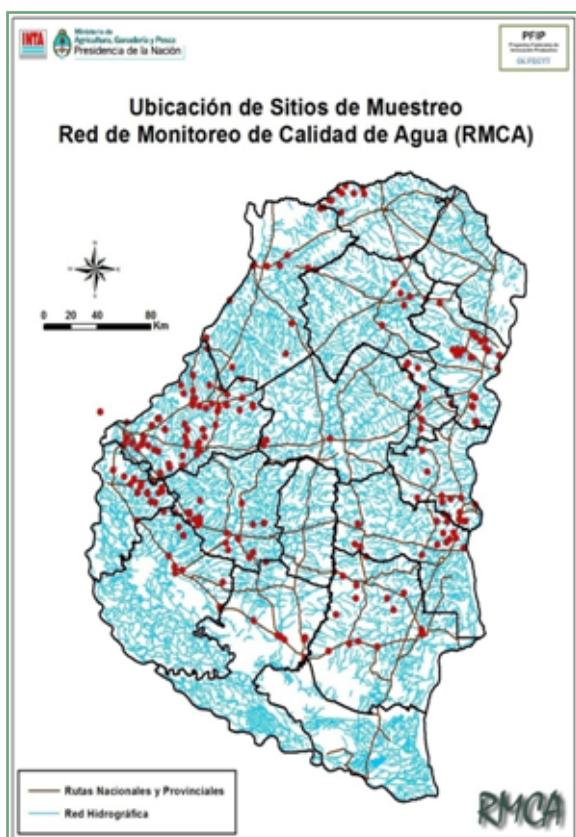


Figura 1. Localización de puntos de muestreo para evaluar calidad de agua superficial en la provincia de Entre Ríos.

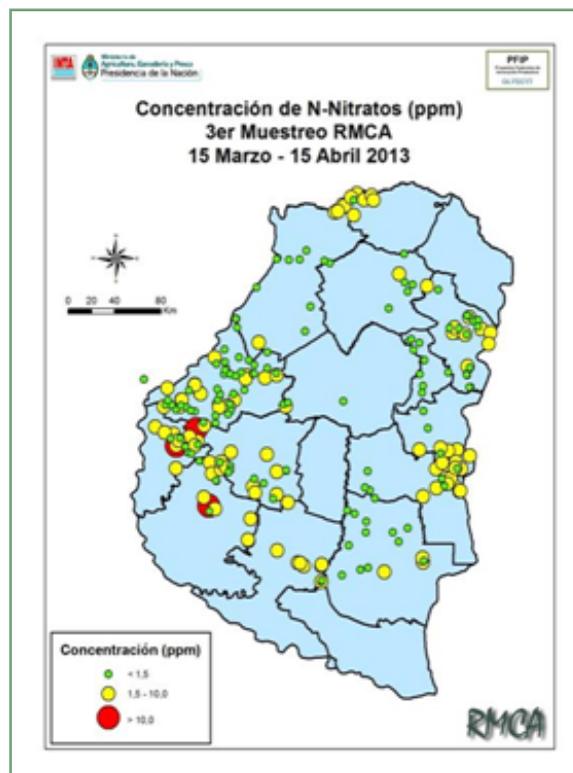


Figura 2. Concentración de N-nitrato (ppm) en cursos de agua superficial de Entre Ríos. Período 15 marzo – 15 abril 2013.

Para P:

- < 0.075 ppm (umbral de eutrofización)
- 0.0075 – 10 ppm
- > 10 ppm (límite tolerado en agua para bebida)

La implementación de la RMCA permitió evaluar un total de 311 puntos de muestreo representativos de los cursos de agua superficial de la provincia, y se analizaron 703 muestras de agua (Figura 1).

Se obtuvieron mapas de concentración de N-nitrato y P en los puntos de muestreo evaluados. La Figura 2 presenta la concentración de N-nitrato, en marzo/abril 2013. Se registró 2.5% de sitios con concentraciones de N-nitrato superiores a 10 ppm y un 32,5% presentó valores inferiores al umbral de eutrofización.

Con relación a la concentración de P detectadas en los cursos de agua de Entre Ríos, en el mismo período (Figura 3), más del 82% de los sitios muestreados presentó valores de P superiores al umbral de eutrofización (0,075 ppm).

Los resultados obtenidos fueron discutidos y analizados por los actores del complejo alimentario provincial en cuatro talleres participativos, a fin de conocer la existencia o ausencia de riesgos de contaminación de aguas por agroquímicos en Entre Ríos. Sin embargo, resulta prioritario profundizar en la interpretación de esta información, dado que el nivel de presencia de los elementos observados en los cursos de agua con una alta dependencia de las precipitaciones respondería no sólo a los aportes de la actividad agrícola, sino también a otras actividades derivadas de la producción ganadera (feed lot, tambo, producción avícola) e industrial. Se requiere además centralizar la atención en las pérdidas de nutrientes por erosión, y su contribución a la concentración de los mismos en cursos de agua superficial. Esta información constituye un valioso aporte para la discusión en el marco de la contaminación ambiental por agroquímicos, dado que posibilita el análisis de la temática con datos y no por percepción.

Escala Cuenca. Cuenca Alta del Arroyo Pergamino, Norte de Buenos Aires

La cuenca alta del Arroyo Pergamino presenta cursos de bajo orden y pequeña escala que constituyen sistemas apropiados para estudios de calidad de agua ligados a uso del suelo debido a que: conectan ambientes terrestres con grandes ríos, tienen tamaño limitado y alta relación superficie/volumen y donde el efecto de los aportes desde la cuenca sobre las concentraciones en agua resulta muy notorio.

En esta cuenca hay 16 perforaciones distribuidas en 5 microcuencas hasta la capa freática (12

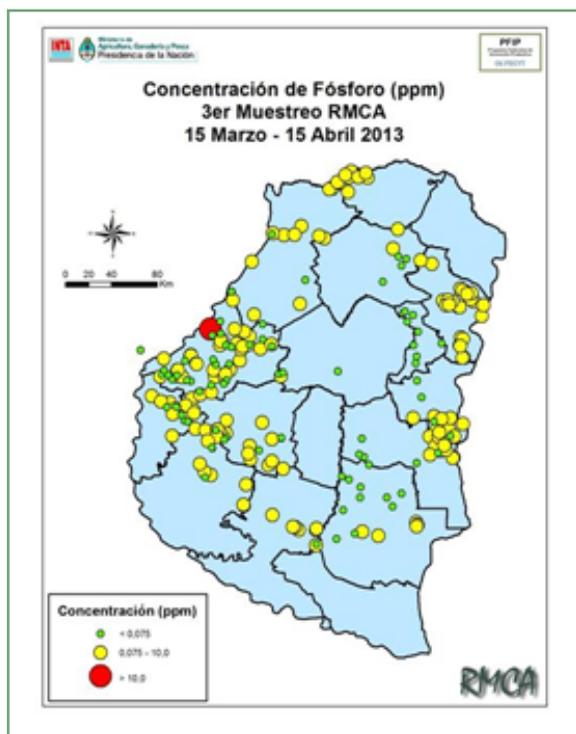


Figura 3. Concentración de P (ppm) en cursos de agua superficial de Entre Ríos. Período 15 marzo – 15 abril 2013.

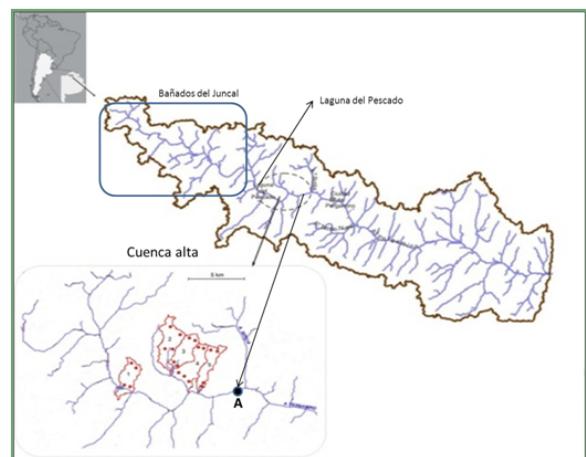


Figura 4. Cuenca del Arroyo Pergamino y zona de estudio (cuenca alta).

m) en posiciones de lomas y media-lomas (**Figura 4**). Entre 2007 y 2013 se realizaron muestreos de agua en 65 fechas de muestreo y se observó que el 50% de las perforaciones tuvieron concentraciones de N-nitrato superiores a 10 mg L⁻¹ bajo agricultura con predominio de soja en siembra directa (SD). Dado que las dosis promedio de fertilizantes fueron ~ 22 y 13 kg ha⁻¹ año⁻¹ de N y P, respectivamente (Andriulo, com. pers.), se confirma la hipótesis referida a que el N mineral provino de la mineralización de la MOS. Por otro lado, con el fin de forzar el escurrimiento (60 mm h⁻¹), se trabajó en condiciones de lluvia simulada luego de la cosecha de soja en 2011. Se perdieron 2.6 y 0.2 kg ha⁻¹ de N y P, respectivamente.

En las partes bajas del paisaje se practica la ganadería vacuna de cría y recría con baja carga animal. Bajo las mismas condiciones de lluvia simulada, se observó que las pérdidas de N y P por erosión son mayores (6.3 y 2.4 kg ha⁻¹) en la franja más cercana a los cursos de agua (ancho 0-5 m) que en las más alejadas (1.6 y 0.2 kg ha⁻¹), con ancho > 15 m (Darder, com. pers.).

Estos resultados mostraron que las pérdidas por escurrimiento de N y P entre el uso agrícola con predominancia de soja y el uso ganadero en las franjas relativamente alejadas de los cursos de agua no fueron diferentes.

A la salida de la cuenca alta del arroyo (punto A de la **Figura 4**) se midieron las concentraciones de N y P durante el período 2010-2012 en 18 fechas de muestreo. Los valores medios de N y P fueron de 2.3 y 0.5 mg L⁻¹, respectivamente. Estos resultaron tan elevados que, independientemente del criterio de clasificación utilizado, el curso se encontró eutrofizado. Los niveles de P pueden ser explicados por la riqueza natural mineral de los sedimentos. Por otro lado, como el arroyo nace luego de una zona de bañados y laguna, el flujo lento y el tiempo de residencia de agua prolongado, favorecen la remoción biológica de N a través de la desnitrificación. Esto produjo que el N fuera el nutriente limitante (Torti y Andriulo, 2014). Además, en este mismo punto y para el mismo período, a partir de las mediciones de caudal, como una primera aproximación, se obtuvieron las pérdidas de nutrientes que escapan anualmente de la cuenca alta: 6±1.5 y 1.3±0.3 kg ha⁻¹ de N y P, respectivamente. Las pérdidas de N y P encontradas por Sasal et al. (2012) en parcelas

de escurrimiento para monocultivo de soja bajo SD, se encontraron dentro del mismo intervalo.

Como consecuencia, resulta necesario ordenar el territorio siguiendo la trayectoria de paisaje:

- en las lomas y media-lomas, donde se practica la agricultura continua, implementar secuencias intensificadas para disminuir la pérdida de MOS
- en los bajos resulta imperativo retirar la producción bovina de las zonas aledañas a los cursos de agua e incorporar franjas ribereñas vegetadas.

Escala Parcela. Parcelas de escorrentía INTA Paraná

En la Estación Experimental de INTA Paraná existen 15 parcelas para medición de volumen y calidad del escurrimiento superficial, construidas en 1970, sobre un suelo Argiudol ácuico con 3.5% de pendiente (**Figura 5**). Estas parcelas fueron diseñadas para medir los coeficientes de cultivos para aplicar en la ecuación universal de pérdida de suelo (Convenio FAO-INTA, 1969-1974). Hasta fines de la década del '90 se cultivaron con sistema de labranza convencional y a partir de entonces cesaron las labores y se continuaron las secuencias de cultivos bajo SD. En 2006 se establecieron cuatro tratamientos con 3 repeticiones cada uno: monocultivo de soja (S), soja continua con trigo como cultivo de cobertura otoño-invernal (CC-S), maíz-trigo/soja (M-T/S) y trigo/soja (T/S).

En la **Tabla 1** se presentan datos de las aplicaciones de fertilizantes para cada tratamiento.

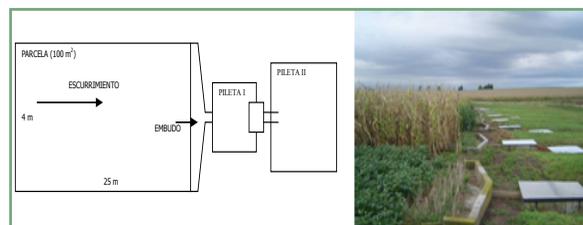


Figura 5. Esquema (vista superior sin escalas) del dispositivo utilizado para medir escurrimientos y pérdidas de glifosato. Imagen donde se aprecian las parcelas y piletas.

Tabla 1. Cantidad de fertilizantes aplicados anualmente a las parcelas de escorrentía para cada tratamiento.

Tratamiento	Fertilización	
	N	P
	kg N ha ⁻¹	kg P ha ⁻¹
S		20
CC-S	55	20
T/S	55	40
M-T/S	120	30

Después de cada lluvia que produjo escurrimiento se midió su volumen y se extrajo una muestra para determinar la concentración de N-nitrato y fósforo disuelto. La cantidad de N y P (kg ha⁻¹) en agua de escurrimiento se calculó como el producto del volumen escurrido por la concentración medida en el agua de escurrimiento del mismo evento.

Se analizaron datos de las últimas 5 campañas 2009/2010; 2010/2011; 2011/2012; 2012/2013 y 2013/2014. El registro de las precipitaciones se realizó en el Observatorio Agrometeorológico de la EEA Paraná, situado a 200 m de los dispositivos.

Los valores medios de escurrimiento anuales para los 5 años analizados oscilaron entre 38 y 210 mm anuales, con 488 (2010/2011) y 1139 mm (2009/2010) de lluvia, respectivamente. Tomando en consideración los 5 años, no se observaron diferencias entre las secuencias de cultivo. Esto puede verse a una gran variabilidad en los datos dependiente de los distintos regímenes hídricos.

Tabla 2. Valores medios de escurrimiento por secuencia de cultivos para todas las campañas analizadas.

Secuencia	Escurrecimiento (mm)	
M-T/S	77,1	a
T/S	98,49	a
CC-S	102,99	a
S	124,8	a

Letras distintas indican diferencias significativas (p<=0,05).

Tabla 4. Cantidad de N y P perdido por escurrimiento por campaña y tratamiento.

Campaña	Lluvia mm	P				N			
		kg ha ⁻¹				kg ha ⁻¹			
		S	CC/S	T/S	M-T/S	S	CC/S	T/S	M-T/S
2009-2010	1139	2.37	2.07	3.21	1.33	17.48	15.24	18.94	11.53
2010-2011	488	0.67	0.78	0.51	0.09	3.78	3.65	2.29	0.63
2011-2012	459	0.86	0.84	0.42	0.14	5.04	5.27	2.85	1.19
2012-2013	1102	0.91	1.38	0.88	0.80	4.39	7.17	5.26	5.12
2013-2014	895	0.86	0.87	0.69	0.31	1.96	3.40	2.13	1.26

Se analizaron por separado los datos de las campañas lluviosas (2009-2010 y 2012-2013), no encontrándose diferencias en el escurrimiento para las secuencias evaluadas. Sin embargo, en las campañas secas 2010-2011 y 2011-2012, se encontraron diferencias en el escurrimiento anual (Tabla 3). La secuencia M-T/S presentó los menores valores de escurrimiento (13.89 mm año⁻¹) y el monocultivo de soja el mayor valor (68.24 mm año⁻¹).

Tabla 3. Escurrecimiento por secuencia de cultivos para años secos (campañas 2010-2011 y 2011-2012).

Secuencia	Escurrecimiento (mm año ⁻¹)	
M-T/S	13.89	a
T/S	35.48	ab
CC-S	50.93	bc
S	68.24	c

Letras distintas indican diferencias significativas(p<=0,05).

La cantidad de N y P perdido por escurrimiento para cada tratamiento se presenta en la Tabla 4.

En la campaña 2009/2010 (lluvia de 1139 mm) se presentaron pérdidas de N y P dos a tres veces superiores que el resto de las campañas analizadas. Para N, existieron diferencias significativas entre campañas analizadas, aunque no se observaron diferencias entre tratamientos e interacción entre tratamiento y campañas. En el caso de P, hubo interacción entre campaña y tratamiento, observándose las menores pérdidas de P en la campaña 2010-2011 para la secuencia M-T/S (0.12 kg ha⁻¹) y las mayores pérdidas en la campaña 2009-2010 para la secuencia T/S (13.72 kg ha⁻¹).

No hubo relación significativa entre la fertilización nitrogenada y fosforada y las pérdidas de nutrientes por escurrimiento, y las mayores pérdidas estuvieron relacionadas a los mayores

volúmenes de escurrimiento de tratamientos sin rotación de cultivos.

Escala Microparcela. Simulación de lluvia para evaluar pérdidas de P por escurrimiento en función de la proximidad de la lluvia

El ensayo se llevó a cabo en la EEA Paraná del INTA en un lote bajo SD (rotación maíz-trigo/soja), para evaluar el efecto de la proximidad de las lluvias a la fertilización. El suelo, Argiudol ácuico serie Tezanos Pinto, es profundo, moderadamente bien drenado, con un epipedón oscuro, franco-arcillo-limoso a franco-limoso el cual posee 27.6% de arcillas predominantemente del tipo ilíticas.

Se planteó la fertilización con 100 kg ha⁻¹ de superfosfato triple (Composición: 0-46-0, con 14 % de Calcio) sobre el suelo sin incorporar. Se establecieron tres fechas de simulación de lluvia luego de la aplicación (Tabla 5) con un diseño completamente aleatorizado en parcelas de 1m². Las simulaciones de lluvia a campo se realizaron empleando un simulador (Figura 6) (Iruetia y Mon, 1994) que posee una parcela de 25 cm de lado con una intensidad de lluvia promedio de 60 mm h⁻¹.

Tabla 5. Fechas de simulación de lluvias para evaluar pérdidas de P por escurrimiento.

Fecha	Simulación	Día calendario
1	24 hs después de la aplicación	07/11/2012
2	5 días después de la aplicación	11/11/2012
3	8 días después de la aplicación	14/11/2012

Se tomaron lecturas de escurrimiento y lluvia caída en intervalos de 5 minutos hasta alcanzar escurrimiento constante y se recolectó toda el agua, se filtró y se realizó el análisis químico de P soluble por colorimetría del ácido ascórbico. La concentración de P (mg L⁻¹) se multiplicó por el volumen total de agua escurrida en 60 minutos para obtener la cantidad de P perdido en kg ha⁻¹.

Las concentraciones de P en agua de escurrimiento oscilaron entre 0.3 y 5.9 mg L⁻¹. Estos valores son similares a los obtenidos en las parcelas de escorrentía en períodos de barbecho (Sasal et al., 2013). Hubo diferencias significativas entre

fechas de simulación. En la primera fecha, las concentraciones de P en agua fueron superiores, diferenciándose de la tercera fecha (Tabla 6), lo que indica que lluvias muy próximas a la aplicación del fertilizante (un día después), favorecerían las pérdidas de P por escurrimiento superficial a una dosis representativa de las utilizadas en la región.

Tabla 6. Análisis de varianza de la concentración de P para las distintas fechas de simulación.

Fecha	Concentración de P (mg L ⁻¹)
1	2.59 a
2	2.06 ab
3	1.57 b

Letras distintas indican diferencias significativas (p<=0,05).

Las cantidades de P en el agua de escurrimiento oscilaron entre 0.02 y 1.9 kg ha⁻¹. La aplicación de P luego de una lluvia de aproximadamente 1 hora con una intensidad de 60 mm h⁻¹, resultó en una pérdida de 4% del P aplicado por fertilización. Esta pérdida reduce la eficiencia de la fertilización y constituye riesgo de contaminación.



Figura 6. Secuencia de instalación de simulador de lluvia y medición.

Consideraciones finales

Este trabajo presenta avances en el estudio del destino de N y P provenientes de agrosistemas. A partir de la información obtenida, se pretende identificar y difundir prácticas agrícolas sostenibles que optimicen la producción, minimizando los riesgos de impacto ambiental.

Se pretende avanzar en la comprensión del funcionamiento de los agrosistemas, comprobar que las metodologías utilizadas permiten diferenciar las causas naturales de las antropogénicas y la influencia de la variabilidad climática sobre la dinámica de los nutrientes. Es muy útil observar que los estudios detectan señales medibles que superan a la variabilidad natural a diferentes escalas; permiten estimar cuánto de esas señales se transmiten aguas abajo y conocer el grado de alteración de sus funciones ecológicas como cuerpos receptores de contaminantes.

Bibliografía

- Álvarez, R., y H.S. Steinbach.** 2006. Balance de carbono en suelos cultivados. En: *Materia orgánica: valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos*. Universidad de Buenos Aires. 55-68 pp.
- Andriulo, A., C. Ferreira, C. Sasal, M. L. Galetto, F. Abrego, M. Bueno, F. Rimatori, M. MA. De la Cruz, M. Venancio, y R. Giacosa.** 2000. Nitratos en el agua subterránea del Partido de Pergamino: efecto a largo plazo de la agricultura continua y a corto plazo de la producción intensiva de granos. Taller Internacional sobre Contaminación de Suelos y Aguas por Agroquímicos. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, 11-14/04/02.
- Arana, A.** 2007. Representando la complejidad ambiental: Dos estudios de caso. *Investigación y Postgrado* (22) 1: 13-57.
- FAO.** 2011. Tendencias recientes en los precios mundiales de los productos alimenticios básicos: costos y beneficios. El estado de la inseguridad alimentaria en el mundo: 11-22.
- Matlock, M. D., y R. A. Morgan.** 2011. *Ecological engineering design. Restoring and conserving ecosystem services*. John Wiley & Sons, Inc, New Jersey. 339 p.
- Portela, S., A. Andriulo, M.C. Sasal, B. Mary, y E. Jobbágy.** 2006. Fertilizer vs. organic matter contribution to nitrogen leaching in cropping systems of the Pampas: 15N applications in field lysimeters. *Plant Soil* 289:265-277.
- Rimski-Korsakov, H., G. Rubio, y R.S. Lavado.** 2009. Effect of Water Stress in Maize Crop Production and Nitrogen Fertilizer Fate. *Journal of Plant Nutrition* 32: 565-578.

- Sasal, M.C., M.G. Wilson, A.E. Andriulo, J.D. Oszust, y E.A. Gabioud.** 2013. Estudios del impacto de la agricultura sobre la calidad del agua. Simposio Fertilidad 2013. *Nutrición de cultivos para la intensificación productiva sustentable*. pp: 286-293. IPNI-Fertilizar AC.
- Sasal, M.C., Andriulo, A.E., Wilson, M.G., Portela, S.I.** 2010. Pérdidas de glifosato por drenaje y escurrimiento en molisoles bajo siembra directa. *Información Tecnológica* Vol. 21 (5): 135-142.
- Scotta, E., y O. Paparotti.** 1990. Aguas excedentes y tecnologías de control y captación. Pp 57-69 en: *Publicación Miscelánea N° 57, Jornadas Regionales "Labranzas y conservación de suelos"* INTA EEA Rafaela.
- Torti, M.J., y A.E. Andriulo.** 2014. Dinámica espacial y temporal de fracciones de fósforo y nitrógeno en el Arroyo Pergamino (Buenos Aires, Argentina). *Actas del II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, FICH-UNL*. Santa Fe, 23-26 sept. ■

[volver al índice](#)

El valor de los estudios de largo plazo para el manejo de la nutrición de soja

Martin Díaz-Zorita

Monsanto BioAg, Pilar (BA), Argentina – Fertilizar Asociación Civil

*Contacto: martin.diaz.zorita@monsantobioag.com

Las limitaciones en la disponibilidad de nutrientes para la eficiente producción de soja [*Glycine max* (L.) Merrill] tiene reconocida importancia en todos los sistemas de producción argentinos. Las respuestas a su manejo muestran variaciones espaciales (entre regiones) y temporales (a lo largo del tiempo) asociados en algunos casos a la intensificación o a cambios en las condiciones de producción. Entre estas últimas se destacan la implementación de estrategias de manejo de la nutrición y la participación de soja en secuencias de cultivo. Los resultados de estos procesos se manifiestan en el largo plazo y pueden ser el origen de otros efectos no deseados sobre los sistemas agropecuarios. Según Truog (1938), la decadencia de los suelos es el resultado de la extracción de nutrientes y antecede a la destrucción por erosión y a la ruina económica. Esta aseveración surgió en el marco de sistemas de manejo de suelos con intensos laboreos que aceleraron la ocurrencia de procesos erosivos severos. Actualmente, en la gran mayoría del área agrícola argentino se realizan prácticas de manejo de suelo de conservación con siembras sin remoción siendo de importancia no descuidar la formación y conservación de materia orgánica para su satisfactorio funcionamiento. En este contexto es que el manejo de la nutrición cobra relevante importancia para los sistemas productivos y requiere de su análisis permanente tanto por efectos de corto como de largo plazo. Si bien abunda información de evaluaciones independientes del comportamiento de soja según secuencias de cultivos y niveles de fertilización, principalmente con fósforo (P), los estudios de los efectos de largo plazo de estas prácticas son menos frecuentes.

Entre los elementos requeridos para la normal nutrición de soja, la oferta de nitrógeno (N) se relaciona directamente con los contenidos de materia orgánica de los suelos (MOS) y la demanda de la soja es complementada a partir del proceso natural de fijación biológica del N atmosférico (FBN). En la medida que los contenidos de MOS decrecen los aportes de la FBN son de mayor

relevancia y explican porque la inoculación con *Bradyrhizobium japonicum* o *B. elkanii* acompaña la expansión del cultivo. Resultados provenientes de 707 sitios con antecedentes de producción de soja (“suelos rotados”) muestran que tratamientos inoculados superaron al control sin inocular en 243 kg ha^{-1} ($p=0,0001$), independientemente de la productividad del sitio (Piccinetti et al., 2013). Esta consistencia, desde los inicios de la producción de soja en Argentina, sustenta la alta utilización de inoculantes para el sostenimiento de la producción.

Diferente es el caso de la nutrición con P dado que, cubiertas las necesidades de N, sólo la disponibilidad de formas inorgánicas (i.e. niveles extractables del suelo o aportados por fertilizantes con P) se constituye en el principal nutriente limitante de la productividad de soja. Es conocido que la respuesta a la corrección por fertilización con P aumenta cuando sus niveles extractables (según el método de Bray Kurtz 1) de la capa superficial de los suelos disminuye, estableciéndose como umbral de respuesta valores de inferiores a 16 mg kg^{-1} (Ferraris et al., 2008). Durante las últimas décadas, el área de limitación fosfatada para la alta producción de soja se ha expandido (Díaz-Zorita y García, 2013). Sainz Rosas et al. (2012), mostraron que en la mayor parte de los suelos de la región pampeana, aproximadamente en 15.227.000 ha, los niveles de P extractable son inferiores o iguales a 15 mg kg^{-1} , por lo que la disponibilidad de este elemento limitaría la normal producción de los cultivos en esta área.

Es propósito de esta presentación la discusión de algunos resultados de evaluaciones de largo plazo para el manejo de la nutrición fosfatada de soja atendiendo a las condiciones actuales de producción en gran parte de la región sojera de Argentina.

Estrategias de fertilización fosfatada en secuencias de cultivos

Los niveles de P extractable están en parte definidos por las propiedades fisicoquímicas originales de los suelos siendo afectados por prácticas de manejo que inciden sobre el balance aparente entre niveles extraídos (o trasladados) y los aportes al fertilizar. Surgen así discusiones sobre la conveniencia ante correcciones para la nutrición con P (y K) aplicando criterios de suficiencia nutricional de los cultivos o de reposición de los elementos removidos con su producción para mantener formas disponibles en el suelo. La implementación de estas diferentes estrategias afectan no sólo los niveles de fertilidad de los suelos sino los resultados de los sistemas de producción de cultivos. Los planteos según criterios de suficiencia de nutrientes buscan corregir necesidades anuales de nutrientes (“fertilizando el cultivo”) y conducen en el largo plazo al establecimiento de rendimientos de entre el 5 y el 10% inferiores al máximo alcanzable al reducir potenciales riesgos de no lograr respuestas rentables en el año de aplicación de la corrección (Leikam et al., 2010). Esta es una estrategia frecuente en condiciones de limitados recursos para inversiones, tenencias de la tierra de corto plazo y requiere del frecuente y preciso muestreo y análisis de suelos conduciendo a la generalización de limitaciones en los nutrientes en el largo plazo. En contraposición, las estrategias de fertilización de mantenimiento (y en su caso extremo de crecimiento) se independizan en parte de los cultivos buscando correcciones que compensen la extracción de nutrientes y el mantenimiento de niveles nutricionales que no limiten la productividad maximizando los rendimientos (Leikam et al., 2010). Estas observaciones son validadas en estudios para evaluar los efectos de largo plazo de estas estrategias de manejo de cultivos y de la fertilización desarrollados localmente.

Ensayos de evaluaciones de secuencias de cultivos conducidos por el grupo CREA América en la región de la pampa arenosa muestran que luego de 5 años de producción en presencia de soja, aún en rotación con cultivos de maíz (*Zea mays* L.), los niveles de P extractable disminuyen en mayor magnitud (**Figura 1**). Este comportamiento es en parte atribuido a que dados los niveles de P del suelo (en promedio superiores a 16 mg kg⁻¹), la aplicación de fertilizantes con P solo se realizó en el caso de cultivos de maíz y por lo tanto la presencia de soja

condujo a balances netos negativos del nutriente. En este estudio, los rendimientos de maíz variaron entre 813 y 11640 kg ha⁻¹ mostrando variaciones tanto entre campañas como entre secuencias de cultivo. En cambio, los de soja mostraron una menor variabilidad (2300 a 5809 kg ha⁻¹) siendo mayormente modificados por variaciones estacionales. La implementación de sistemas continuos de cultivos de maíz o de soja tiende a reducir la productividad principalmente de maíz. En promedio, luego de cuatro años, los rendimientos de maíz en rotación con soja son un 18% superiores que en secuencias continuas desde su implementación mientras que en soja esta brecha es del 6% y tiende a manifestarse luego de 3 años de prácticas continuas de cultivo (Díaz-Zorita et al., 2014).

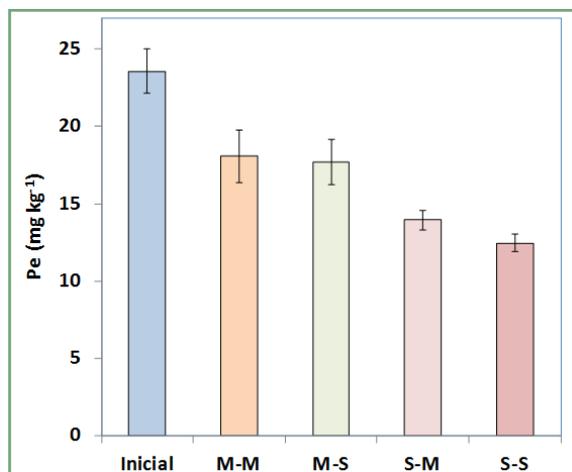


Figura 1. Niveles de P extractable de la capa superior de molisoles de la región de la pampa arenosa luego de 5 años de cultivos de soja y de maíz en secuencias continuas o en rotación. Promedio de 3 sitios experimentales. M: maíz, S: soja. (CREA América, inédito).

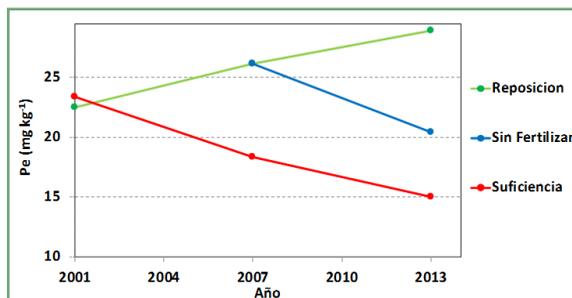


Figura 2. Evolución de niveles medios de P extractable de la capa superior en un suelo representativo de la región de la pampa arenosa bajo producción agrícola diversa según estrategias de fertilización fosfatada. Cada punto de observación representa el promedio de 36 puntos georeferenciados de muestreo compuesto (Barraco, inédito).

Similares resultados se observan también en sistemas de producción con secuencias más diversificadas de cultivos al implementarse estrategias de fertilización por suficiencia donde sólo se aplican fertilizantes fosfatados en condiciones de probable respuesta a la práctica (Figura 2). Este ensayo se desarrolla en un sitio representativo de la región de la pampa arenosa en General Villegas (Buenos Aires) en Hapludoles con maíz, soja, girasol (*Helianthus annuus* L.) y trigo (*Triticum aestivum* L.) en secuencia continua y completa donde todos los años se cultivan todos los cultivos de la rotación (Barraco et al. 2014). Luego de 13 años de fertilizar con dosis equivalentes a la extracción media aparente de P, los niveles extractables del suelo se incrementaron mientras que la fertilización por suficiencia (solo en cultivos y sitios con potencial respuesta a la aplicación) condujo a la reducción anual a razón de aproximadamente 1 mg kg⁻¹. Esta magnitud es semejante al proceso de pérdida de oferta de P en suelos pampeanos, e independiente del cultivo predominante en los sistemas de producción. Mayor es la tasa de pérdida del nutriente cuando ninguno de los cultivos es fertilizado, tal lo describe el tratamiento de ausencia de fertilización con P instalado luego de superado un alto nivel extractable del elemento (Figura 2).

En el mismo estudio, todos los cultivos en rotación (girasol, maíz, soja y trigo) mostraron mayores rendimientos en planteos de fertilización de mantenimiento que bajo estrategias de suficiencia (Figura 3). En promedio para 13 años consecutivos de aplicación de estas estrategias de recomendación de dosis de fertilización fosfatada se observaron mayores diferencias en los

rendimientos de los cereales (trigo y maíz) que en los cultivos de oleaginosas. Estas observaciones coinciden con lo sugerido por Thomas (1989): sólo cuando la oferta de P de los suelos es suficientemente alta y las respuestas de los cultivos a la aplicación de este elemento es pequeña tiene sentido utilizar parte (extraer) de esta fertilidad.

Fertilización fosfatada en secuencias continuas de soja

Los cambios en el uso y la cobertura de la tierra no son atribuibles a un cultivo en sí mismo sino al hombre por la continua búsqueda de rentas económicas favorables en el corto plazo (Pincen et al., 2010). Es así que en gran parte del área agrícola de Argentina predomine la producción de soja con una alta proporción de sitios con reiteración del cultivo entre campañas. Esta condición de manejo junto con la moderada y variable respuesta de soja a la nutrición con P conduce al moderado uso de fertilizantes en el cultivo y explica la frecuente detección de sitios con niveles extractables insuficientes para su normal producción. El área fertilizada mayormente con fuente fosfatada, alcanza el 68% de la superficie sembrada con dosis medias de fertilizantes inferiores a la extracción de nutrientes del cultivo (García y González Sanjuan, 2012).

Numerosos estudios, mayormente desarrollados en secuencias con otros cultivos en rotación, analizan el comportamiento de soja, en relación con los niveles de P y la fertilización con este elemento. Sin embargo, son escasos los estudios que consideran este análisis en sistemas continuos de soja. Uno de estos fue iniciado en

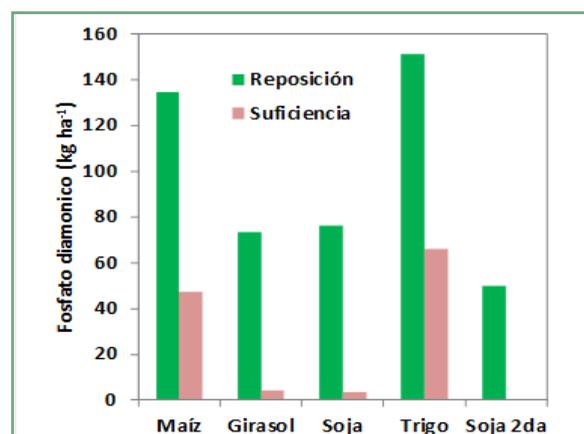
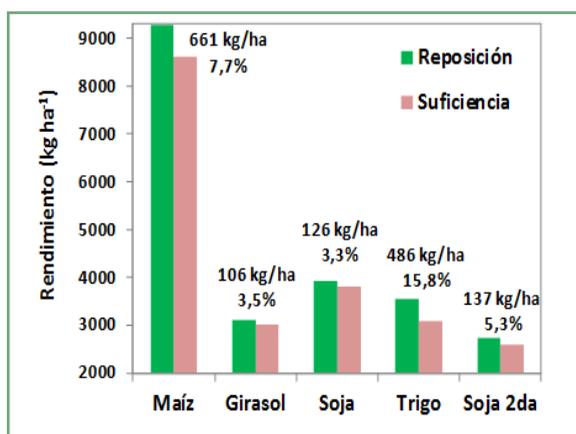


Figura 3. Rendimientos medios y dosis anual de fertilización de cultivos en rotación en un suelo representativo de la región de la pampa arenosa según estrategias de fertilización fosfatada. Promedio de 13 campañas productivas (Barraco, inédito).

la campaña 2010/11 y es coordinado por Fertilizar Asociación Civil (Bermúdez et al., 2014). El objetivo de este trabajo es cuantificar la producción de soja según dosis y momento de la fertilización con P en sitios y condiciones representativas de manejo del cultivo bajo prácticas de siembra directa en la región pampeana. El estudio contempla 10 localidades durante entre 1 y 4 años de evaluaciones alcanzando 19 casos (sitios x campañas) analizados hasta la campaña 2013/14. En cada sitio se instalaron diferentes tratamientos de manejo de la fertilización contemplando un control sin fertilización, la aplicación "tradicional" (dosis baja – 8 a 15 kg ha⁻¹ de P - en la siembra y en la línea de siembra), fertilización en superficie en dosis mayores a la tradicional tanto anticipada como en el momento de la siembra y aplicación fraccionada del fertilizante 30% localizada en la línea de siembra y el resto (70 %) en superficie anticipada. Los sitios experimentales se ubicaron próximos a Aldao (Santa Fe), América (Buenos Aires), Carcarañá (Santa Fe), Concepción del Uruguay (Entre Ríos), Ferré (Buenos Aires), General Pico (La Pampa), Nueve de Julio (Buenos Aires), Río Cuarto (Córdoba) y Tres Arroyos (Buenos Aires). Los cultivos se sembraron con semillas de soja de variedades de alta producción según cada región, inoculadas con productos comerciales conteniendo *Bradyrhizobium japonicum* para proveer una adecuada nutrición nitrogenada. Además, en todos los experimentos se aplicó azufre (S) para corregir posibles deficiencias de este nutriente.

Los suelos donde se realizaron los ensayos son representativos de los lotes agrícolas con contenido de materia orgánica inferior a 2.8%, de P extractables en un rango de entre 10 y 15 mg kg⁻¹ y rendimientos de soja de entre 1594 y 5927 kg ha⁻¹. El análisis en conjunto a través de todos los sitios y años mostró que el rendimiento promedio sin fertilización con P fue de 3243 kg ha⁻¹ con una respuesta, en promedio para los tratamientos de fertilización, de 576 kg ha⁻¹. Entre las estrategias de fertilización consideradas, los mayores rendimientos se lograron al aplicar dosis superiores a las frecuentes en cada región de producción y en particular cuando esta se dividió entre la siembra y anticipada a esta (Figura 4). Este último tratamiento (fertilización combinada entre siembra y presiembra) mostró la mayor eficiencia de uso del fertilizante (6.2 kg de granos producidos por kg de fertilizante aplicado) superando a la aplicación localizada en la siembra [5.1 kg de granos (kg de

fertilizante)⁻¹] y a la fertilización superficial pre-siembra [4.3 kg de granos (kg de fertilizante)⁻¹]. La aplicación en la banda de siembra de dosis de P mayores a las frecuentemente utilizadas, resultaría en un aumento en la respuesta en producción de soja. Sin embargo, este aumento de dosis podría reducir la implantación de los cultivos por riesgo de fitotoxicidad y limitar la respuesta en producción. Es así que la corrección con fertilizante aplicado en superficie mostraría mayor consistencia en la respuesta del cultivo dependiendo de su momento de utilización.

Las mayores respuestas a la fertilización se describieron en sitios con niveles de P extractable inferiores a 10 mg kg⁻¹ decreciendo la magnitud de las respuestas al incrementarse los niveles de P de los suelos (Figura 5). Estos resultados sustentan el valor de considerar como herramienta de diagnóstico el muestreo y análisis de los suelos para la implementación de estrategias de manejo de la nutrición fosfatada del cultivo. La información disponible no fue suficiente para describir diferencias relevantes en la respuesta de los cultivos según la duración del ciclo de producción. En otras palabras, con las dosis de fertilización consideradas y los niveles de rendimientos alcanzados los cambios en la fertilidad de los suelos fueron insuficientes para limitar o amplificar las respuestas detectadas desde el inicio de los estudios. Sí se observó que al emplear las mayores dosis de fertilización, la frecuencia

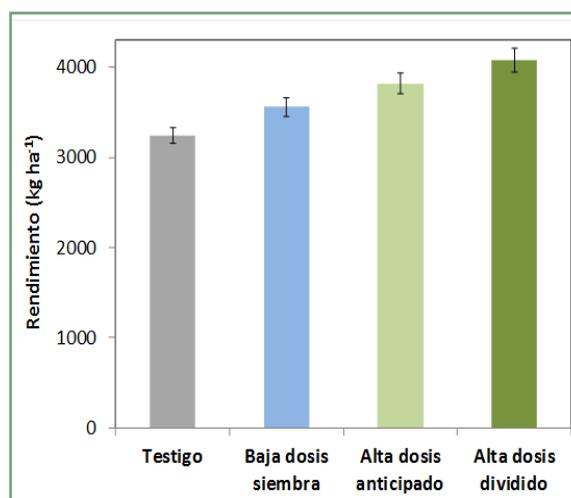


Figura 4. Rendimiento de soja según dosis y momentos de fertilización en sistemas continuos del cultivo en la región pampeana. Promedio de 19 casos. Las barras en cada columna muestran el error estándar de la media.

de casos con respuesta y su magnitud también fueron mayores (**Figura 5**).

En los primeros años del estudio se compararon momentos de aplicación de la fertilización en superficie. Se observó, que los tratamientos con dosis alta de fertilización con P, aplicados tanto en el invierno como en la siembra, mostraron mayores rendimientos con respecto al tratamiento sin fertilizar (703 kg ha⁻¹, p≤0.05) o fertilizados con la dosis base incorporada al sembrar (186 kg ha⁻¹, p≤0.05). Estos resultados sugieren que los niveles de P aplicados como base a la siembra, definidos según el uso frecuente en cada región estudiada, fueron insuficientes para alcanzar los máximos rendimientos. Por lo tanto, la fertilización con dosis mayores a 8 o 15 kg de P ha⁻¹ permitieron mejorar los rendimientos. Además, en las condiciones de estos estudios, tanto la respuesta relativa a la aplicación P como la diferencia en producción según dosis de fertilización con P fueron indistintas de los años de aplicación (**Tabla 1**).

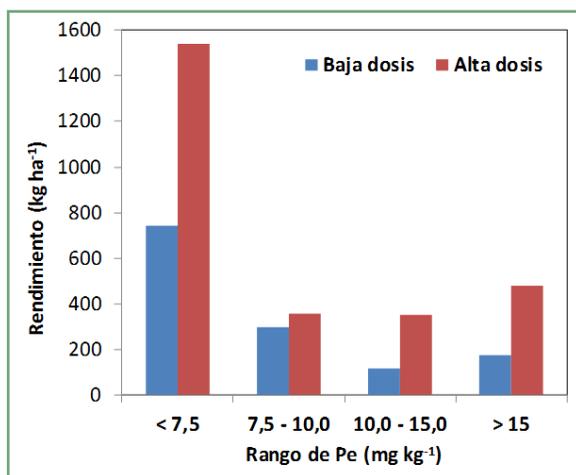


Figura 5. Respuestas de soja a la fertilización fosfatada según rangos de niveles de P extractable (método Bray Kurtz 1) en suelos bajo sistemas continuos del cultivo en la región pampeana. Promedio de 19 casos.

Tabla 1. Respuesta (kg ha⁻¹) en rendimiento de soja al agregado de P y diferencias entre la respuesta a la fertilización en dosis alta y dosis base de P para los 12 sitios evaluados. La ausencia de letras distintas indican la ausencia de diferencias significativas entre campañas (P ≤ 0.05). (Bermudez et al., 2014).

Tratamientos	Campaña		
	2010	2011	2012
Fertilizados con P - control	363 a	214 a	378 a
Dosis alta – Dosis base	300 a	491 a	445 a

En las condiciones de este estudio, la dosis de P aplicado de base al fertilizar en el momento de la siembra mostró ser insuficiente para reponer la exportación media de P en los granos generando balances aparentes negativos de P (**Figura 6**). Al superarse los 15 kg de P aplicado ha⁻¹ (mayor dosis de fertilización de base frecuentemente descrita en sistemas productivos pampeanos) no solo se incrementaron los rendimientos sino que se lograron balances aparente medios del nutriente positivos. El testigo sin fertilizar y el tratamiento que recibió entre 8 y 15 kg de P ha⁻¹ mostraron un balance aparente negativo del P. En cambio, si bien el tratamiento que recibió 15 kg de P ha⁻¹ alcanzó altos rendimientos, la cantidad aportada de P cubrió la demanda del cultivo alcanzado un balance positivo de 2.8 kg de ha⁻¹. Los tratamientos con la aplicación de entre 25 y 29 kg de P ha⁻¹ mostraron balance positivos de P de entre 7 y 18 kg ha⁻¹ (Bermúdez et al., 2014).

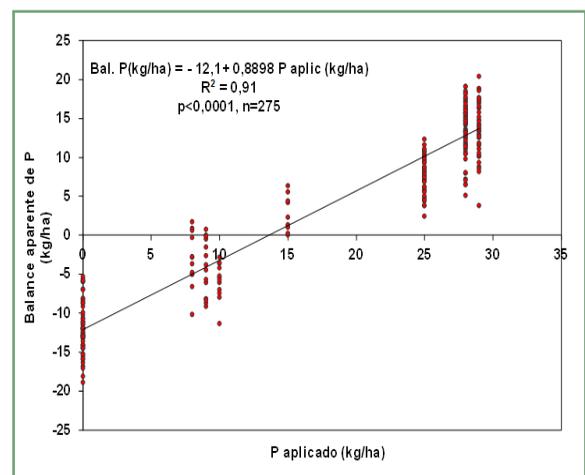


Figura 6. Balance aparente de P según dosis de fertilización con P en 5 sitios representativos de la región pampeana de Argentina y 3 campañas productivas (Bermúdez et al., 2014).

La calidad nutricional de los granos de soja producidos, evaluada en términos de la concentración de P tendió a ser mejor en los tratamientos fertilizados que en ausencia de esta práctica. En promedio, los contenidos de P en los granos de los tratamientos de fertilización en dosis de base fueron 2.6% mayores que el control sin fertilizar. La aplicación de altas dosis de fertilización con P, independientemente de la ubicación y momento de fertilización, permitió incrementar en promedio 6.6% la concentración del nutriente en los granos (**Tabla 2**). Los contenidos medios de proteínas, evaluados en 5 sitios durante la campaña 2013/14, no mostraron diferencias entre tratamientos fertilizados (37.0%) y sin fertilizar (37.1%). Si bien la concentración de proteínas en los granos tendió a decrecer al aumentar la producción esta relación no se observó dentro de cada sitio experimental sino entre estos.

Tabla 2. Concentración de P en granos de soja (%) según diferentes dosis y momento de aplicación de P. Promedio de 12 sitios (campañas 2010/11 a 2012/13). Entre paréntesis se indica el error estándar de la media (Bermúdez et al., 2014).

Tratamiento	P en granos
Testigo sin fertilizar	0.39 (0,010)
P base siembra	0.40 (0,009)
P alto al voleo	0.42 (0,006)
P alto fraccionado	0.41 (0,008)

Consideraciones finales

Los estudios de larga duración permiten establecer estrategias de manejo de la fertilización considerando los efectos de decisiones reiteradas entre campañas tanto sobre la producción de los cultivos como sobre la fertilidad de los suelos. Los resultados descriptos en evaluaciones en la región sojera de Argentina validan que los planteos de secuencias diversificadas de cultivos que incluyan soja son una herramienta parcial de conservación de la fertilidad de los suelos si el manejo de la fertilización se sustenta solo en decisiones de fertilización según criterios de suficiencia. La inclusión de cereales en estas secuencias junto con planteos de mantenimiento de la oferta de P aporta no sólo a la conservación de su fertilidad sino también a alcanzar máximos rendimientos de soja.

Bajo condiciones continuas de cultivo de soja, los niveles medios de fertilización con P frecuentemente aplicados en la región pampeana son insuficientes para alcanzar máximos rendimientos y eficiencias de uso del nutriente. Los resultados de la evaluación de 19 casos representativos de la región en suelos con limitaciones en la oferta de P muestran que la aplicación de una dosis de base en el momento de la siembra de entre 8 y 15 kg ha⁻¹ de P, logra incrementar parcialmente la producción de granos (317 kg ha⁻¹). Las mayores mejoras en rendimientos se logran con dosis de entre 25 y 29 kg ha⁻¹ de P aplicadas en superficie (“al voleo”) durante el barbecho en el invierno o en pre-siembra de los cultivos o combinando 70% de la dosis en superficie y el resto localizada en el momento de la siembra. En promedio, la fertilización en superficie mostró aumentos de 577 kg ha⁻¹ y 836 kg ha⁻¹ con aplicaciones fraccionadas. Esta última alternativa además de contribuir a incrementar los rendimientos, permitiría desarrollar estrategias de manejo de la fertilización que permitan mejorar los balances aparentes del nutriente al compensar en mayor proporción los niveles de exportación de P en los granos.

Agradecimientos

Al Ing. Agr. Daniel Trasmonte e integrantes del grupo CREA América por la gestión del estudio de larga duración de secuencias de cultivos y disponibilidad de la información. A las Ing. Agr. Mirian Barraco y Valeria Parra por sus aportes de gestión y análisis del estudio de estrategias de fertilización de largo plazo y a la EEA INTA “General Villegas” por la financiación y apoyo de este estudio. A los Ing. Agr. Manuel Bermúdez, Gabriel Espósito, Gustavo Ferraris, Guillermo Gerster, Matías Saks, Fernando Salvagiotti, Luis Ventimiglia, Norma Arias, Cristian Alvarez, Martin Zamora y Cristian Brambilla y a Fertilizar Asociación Civil por la financiación y conducción de los estudios de fertilización en secuencias continuas de soja.

Bibliografía

- Barraco, M., M. Díaz-Zorita, C. Justo, y A. Lardone.** 2014. ¿Fertilización fosfatada por suficiencia o restitución en secuencias agrícolas de la pampa arenosa? *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 16 (Diciembre): 8-12
- Bermúdez, M., M. Díaz-Zorita, G. Espósito, G. Ferraris, G. Gerster, M. Saks, F. Salvagiotti, y L. Ventimiglia.** 2014. Fertilización con fósforo en secuencias continuas de soja. *Actas del XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Bahía Blanca (BA)*. En CD.
- Díaz-Zorita, M., y F.O. García.** 2013. Estado actual de fertilidad de suelos en la Argentina. En: Tercera Jornada del Instituto de Investigaciones en Biociencias Agrícolas y Ambientales: Aportes de la microbiología a la producción de cultivos. pp 19-27.
- Díaz-Zorita, M., M. Barraco, y D. Trasmonte.** 2014. ¿Rotaciones o monocultivos en la pampa arenosa? *Actas del XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Bahía Blanca (BA)*. En CD.
- Ferraris, G.** 2008. Fertilización de la soja. pp 261 – 278. En: R. Melgar y M. Díaz-Zorita (eds). *Fertilización de cultivos y pasturas, 2da edición ampliada y actualizada*. 569 pp.
- García F.O., y M.F. González Sanjuán.** 2012. La nutrición de suelos y el balance de nutrientes ¿Cómo estamos? Fertilizar Asociación Civil. Diciembre 2012, Revista N°24.
- Leikam, D., G. Randall, y A. Mallarino.** 2010. Are current soil test-based phosphorus and potassium fertilizer recommendations adequate? *Crops and Soils* 43: 27-32.
- Piccinetti, C., N. Arias, L. Ventimiglia, L., M. Díaz-Zorita, L. Murua, H. Sanchez, G. Ferraris, F. Mousegne, H. Fontanetto, E. Sá Pereira, J. Capurro, J. Enrico, C. Lopez, A. Carrizo, F. Salvagiotti, D. Collino, y A. Peticari.** 2013 Efectos positivos de la inoculación de soja sobre la nodulación, la FBN y en los parámetros de producción del cultivo. En: Albanesi A (Ed.), *Microbiología agrícola: un aporte de la investigación en Argentina*, 2da edición, Magna Publicaciones, Tucumán (Argentina), pp. 283-297.
- Pincen, D., E.F. Viglizzo, L.V. Carreño, L.V., y F.C. Frank.** 2010. La relación soja-ecología-ambiente. Entre el mito y la realidad. En: Viglizzo, E.F.; Jobbagy, E. (editores). *Expansión de la frontera agropecuaria argentina y su impacto ecológico-ambiental*. Ediciones INTA, Buenos Aires (Argentina), pp. 53-61.
- Sainz Rozas, H., H. Echeverría, y H. Angelini.** 2012. Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región Pampeana y ExtraPampeana argentina. *RIA* 38 (1): 33-39.
- Thomas, G.W.** 1989. The soil bank account and the farmer's bank account. *J. Production Agriculture* 2: 122-124.
- Truog, E.** 1938. Putting soil science to work. *J. Am. Soc. Agron.* 30: 973-985. ■

[volver al índice](#)

La fertilización y una visión empresaria de largo plazo

Hugo Ghio

Ing. Agr., Productor, Miembro de AAPRESID y Bioceres S.A.

Contacto: hghio@futurnet.com.ar

Visión general y personal de la fertilización en Argentina

La producción agropecuaria en Argentina se realizó y concibió desde sus inicios como una combinación de agricultura y pradera, donde con la agricultura se extraían los nutrientes presentes en el suelo, durante 5-6 años, y posteriormente con 4-5 años de pradera, los mismos eran recuperados, al menos parcialmente.

Con el paso del tiempo, más precisamente durante la década del '70, esa rotación de agricultura y ganadería fue cambiando, la ganadería fue dejando los espacios a la agricultura, principalmente en las zonas con mayor potencial agroecológico y desplazándose a otras zonas donde la ganadería podía desarrollarse sin mayores inconvenientes. Sin embargo, ese cambio en el modelo productivo de agricultura continua, no fue acompañado por un cambio en el uso de algunos insumos, especialmente el de los fertilizantes.

Con una agricultura continua y sin una fertilización adecuada, poco a poco, los niveles de nutrientes del suelo fueron disminuyendo. Durante la década del '70 se hace evidente la deficiencia de nitrógeno (N) y comienza así su aplicación, durante la década del '80 la de fósforo (P) y durante la del '90 la deficiencia y aplicación de azufre (S).

Este cambio en el modelo productivo, intensificado a fines de la década del '80 con el advenimiento de la siembra directa y el crecimiento de la soja en el país, intensifica aún más la disminución de nutrientes del suelo, dado que había una mayor extracción por cultivos y aún no se había generalizado la utilización de fertilizantes.

Es importante considerar que los nutrientes tienen distintos patrones respecto a sus formas o posibilidades de recuperación en los suelos agrícolas:

- “Asociados al manejo”: para el caso de N y S, su disponibilidad está muy asociada al tipo de manejo que hagamos, es decir, podemos

mejorar los niveles de N en el suelo no sólo fertilizando, sino también con técnicas de manejo y/o cultivos que se implanten. Esas técnicas, en general, están asociadas a preservar y/o mejorar los niveles de materia orgánica.

- “Minerales”: para el caso del P, y también K, su reposición sólo es posible a través de la fertilización u otras enmiendas. Las técnicas de manejo pueden beneficiar la eficiencia de uso.

Esta situación nos plantea un desafío al momento de definir estratégicamente cómo nos vamos a manejar, ya no podemos mantener un modelo de producción sustentable basado en el mínimo uso de fertilizantes, es necesario poner foco en la potencialidad del ambiente y en el aporte adecuado de insumos, especialmente los nutrientes, para que éste pueda expresar todo su potencial.

Cuando trabajamos para una agricultura sustentable, pensamos en una agricultura que no degrade, que no contamine, que considere la inclusión y el desarrollo social y que preserve los recursos naturales existentes con los disturbios mínimos propios de la actividad. Es así que en este contexto, el foco está en maximizar la productividad del ambiente, con la correcta asignación de recursos e insumos que nos permitan obtener productos de calidad y un resultado económico que nos de sostenibilidad en el largo plazo y nos permita ser competitivos local e internacionalmente.

¿Cómo imputamos el costo e impacto futuro del fertilizante?

Durante mucho tiempo, con un enfoque netamente “economista”, nos decían que debíamos realizar nuestro planteo productivo a partir del análisis de retorno por peso invertido para cada insumo, así fue que las decisiones agronómicas fueron tomadas con un enfoque parcial. Si esto puede ser cierto para muchas otras actividades, no lo es para la agricultura.

Como productores no podemos pensar campaña a campaña, sino que necesitamos mirar varios años más allá, porque lo que hoy hagamos o dejemos de hacer, repercutirá en el futuro. Hay quienes dicen que “el suelo tiene memoria” y es esa memoria la que nos va a permitir o no, en algunos casos/años puntuales donde las condiciones sean muy desfavorables, poder tomar algo de lo que fuimos construyendo las campañas previas.

Desde el punto de vista económico, los fertilizantes se imputan al cultivo/campaña para el cual se los aplicó, sin embargo, desde el punto de vista agronómico, esa imputación puede prorratearse en algunos años más sobre todo los nutrientes “minerales” y más aún sí es con criterio de reposición. En el caso de los fertilizantes siempre queda un remanente que beneficia a los cultivos posteriores, cosa que no ocurre con ningún otro insumo.

Contexto: los fertilizantes en Argentina y otros países

La **Tabla 1** refleja el balance de nutrientes en distintos países agrícolas. Aquí puede claramente verse que para el caso de Argentina, los porcentajes de reposición en función de la extracción son considerablemente bajos que en otros países.

De la misma forma en las **Figuras 1 y 2** puede observarse el detalle de lo que ocurre con el balance de P, para Canadá, y Argentina. En las **Figuras 3 y 4** se muestra la evolución del P extractable del suelo (P Bray-1) en distintos estados agrícolas de EE.UU. entre 2005 y 2010; y en la región pampeana argentina entre 1980 y 2005.

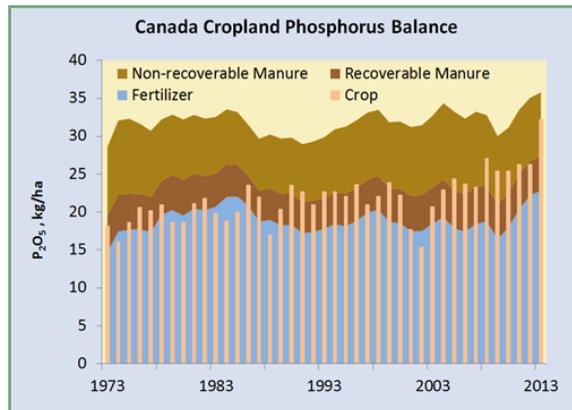


Figura 1. Balance de fósforo en áreas agrícolas de Canadá (incluyendo Alberta, Saskatchewan, Manitoba, Ontario, Quebec, Nova Scotia, New Brunswick, y Prince Edward Island). Aportes de fósforo, considerando el estiércol recuperable y el no recuperable, la fertilización total está expresada en kg de P₂O₅ por hectárea para el total de la superficie agrícola, las áreas apiladas suman el total de aportes. Las barras verticales muestran lo extraído por los cultivos. Disponible en <http://nane.ipni.net/article/NANE-3104>.

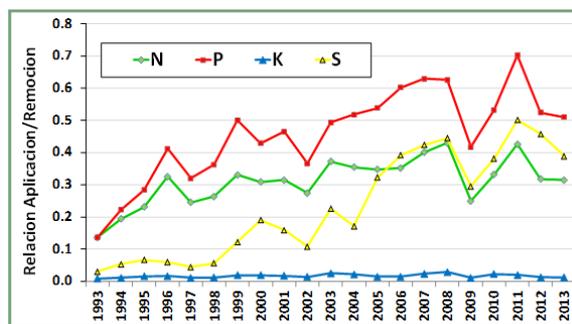


Figura 2. Evolución de la relación entre aplicación y remoción media estimada de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y azufre (S) para soja, maíz, trigo y girasol en Argentina. Periodo 1993-2013. Fuente: Adaptado de García y González San Juan (2013).

Tabla 1. Reposición de nutrientes (aplicado/removido) en los principales cultivos de Argentina, Australia, Brasil, Canadá y EE.UU.

País	Reposición (aplicado/removido por los cultivos, en %)				Fuente	Comentarios
	N	P	K	S		
Argentina	32	51	1	39	IPNI, 2014	Soja, trigo, maíz y girasol
Australia	57	200	- 3-5 kg K por ha	+ 2-4 kg S por ha	Edis et al. (2012)	Áreas de cultivo
Brasil	154	188	123	287	da Cunha y Francisco, 2014	
Canadá	101	81	42		IPNI, 2013	Incluye estiércol recuperable
EE.UU.	130	112	74		NuGIS-IPNI, 2012	Incluye estiércol recuperable

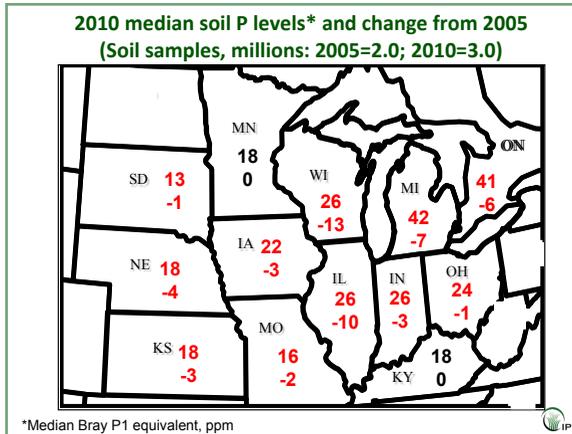


Figura 3. Fósforo extractable del suelo (P Bray-1) en distintos estados de Estados Unidos. Valor superior: indica el nivel de P en el suelo en el 2010 (3 millones de muestras de suelo). Valor inferior: indica la diferencia de 2010 respecto de lo medido en 2005 (2 millones de muestras de suelo). Fuente: Fixen et al. (2010).

Al analizar las posibles causas por las que Argentina no repone lo que consume, podemos clasificarlas en dos grandes rubros:

- Económicas: en función de la relación insumo/producto. En las **Tablas 2 y 3** puede observarse los precios de los insumos y de los granos y a partir de aquí la relación insumo/producto.
- Culturales:
 - o La actividad productiva estuvo asentada desde principios del Siglo XX, sobre un suelo extrema-

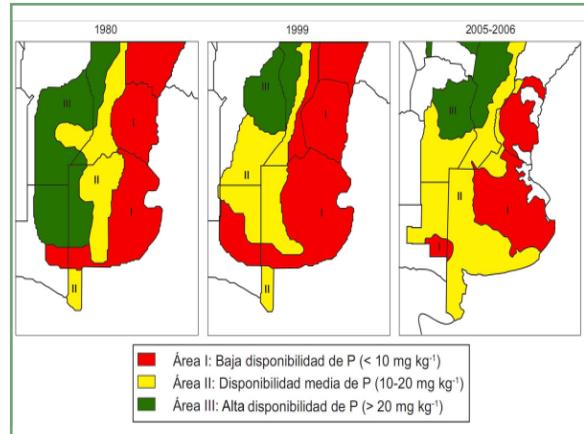


Figura 4. Rangos de concentración de P-Bray en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana en 1980 (Darwich, 1983) y en 1999 (Darwich 1999, com. personal) y rangos de concentración de P-Bray en el muestreo realizado en 2005-06. Adaptado de Sainz Rozas et al. (2011).

- o damente fértil, lo cual generó una producción sin necesidad de fertilizantes, tradición que fue transferida de generación en generación.
- o Formación académica sostenida fuertemente en el viejo paradigma (Agricultura/Pradera).
- o Visión de los economistas: la decisión de uso de insumos y las cantidades fundamentadas en el objetivo de conseguir el mayor retorno por peso invertido.
- o Planteo productivo de la década de los '90, no fue acompañado por un nuevo paradigma en el uso de fertilizantes.

Tabla 2. Precios de los Fertilizantes y Granos para Argentina, Australia, Brasil, Canadá y EE.UU.

Precios	Dólares por tonelada al 3/3/15					Fuente
	Urea	MAP	Soja	Trigo	Maíz	
Brasil	420	595	350	175	150	L. Prochnow, 2/3/15
Australia	420	562	350	213	233	R. Norton, 3/3/15
Oeste de Canadá	500	648		272		T. Jensen, 3/3/15
EE.UU.	523	672	369	184	153	M. Stewart, 3/3/15
Argentina	530	650	235	128	122	Márgenes Agropecuarios, Feb 2015

Tabla 3. Relación Insumo/Producto en los principales cultivos de Argentina, Australia, Brasil, Canadá y EE.UU.

País	Relación Insumo/Producto al 3/3/15				
	Urea/Trigo	MAP/Trigo	Urea/Maíz	MAP/Maíz	MAP/Soja
Brasil	2.40	3.40	2.80	3.97	1.70
Australia	1.97	2.64	1,80	2.41	1.61
Oeste de Canadá	1.84	2.38			
EE.UU.	2.85	3.66	3.41	4.38	1.82
Argentina	4.14	5.08	4.34	5.33	2.77

Experiencia personal

Pensando en una agricultura sustentable, en función de los niveles de P en el suelo, planteamos un cambio en la estrategia de fertilización para todos los cultivos, como forma de maximizar productividad de acuerdo al ambiente y alcanzar los valores de suficiencia a lo largo del tiempo. A continuación podemos ver el resultado de una fracción de campo, con más de 100 años de agricultura y con solo dos oportunidades de pradera en su historia, éstas previas a la década del 70 (Figura 5). La Tabla 4 muestra los incrementos en P extractable (Bray-1) obtenidos entre los periodos 1987/2002 y 2003/2014 en cinco lotes, con aportes de P con criterio de reposición.

Aprendizaje de las experiencias personales

- Si bien los fertilizantes son un insumo de alto impacto en los costos, en el momento de tomar decisiones siempre los incluimos en las dosis recomendadas para el objetivo buscado: en el caso de P pensando en reposición y en el caso de N y S buscando los techos de producción, porque, salvo en condiciones muy extremas, siempre tuvimos retorno.
- Generalmente, en esos años de condiciones extremas, lo que no fue utilizado por el cultivo de esa campaña, quedó como reserva para la campaña siguiente.
- Las gramíneas y la siembra directa mejoran decididamente las condiciones físicas del suelo y para hacer gramíneas de alta producción es necesaria una fertilización adecuada.
- Las condiciones físicas mejoradas por las gramíneas y la SD y las condiciones químicas mejoradas por una fertilización adecuada, re-



Figura 5. Campo Don Osvaldo - Camilo Aldao - Córdoba 312 has.

Tabla 4. Cambios en P extractable entre 1987/2002 y 2003/2014, y extracción, aporte y balance de P de distintos lotes del Establecimiento Don Osvaldo (Camilo Aldao, Córdoba). Determinaciones realizadas en el Laboratorio de INTA Marcos Juárez.

	Lotes					Promedio general por período
	1	2	3	4	5	
P extractable (ppm) Promedio 1987/2002	15	19	8	9	12	13
P extractable (ppm) Promedio 2003/2014	17	24	21	17	26	21
Extracción P(kg/ha) Promedio 2003/2014	26.9	26.4	29.4	30.3	27.1	28
Aporte P (kg P/ha) Promedio 2003/2014	24.2	26.1	22.1	25.5	24.4	24.5
Balance P (kg P/ha) 2003/2014	-2.8	-0.2	-7.3	-4.8	-2.7	-3.5

percuten fuertemente de manera positiva en el resultado de todos los cultivos futuros, a partir de la creación de un nuevo ambiente productivo.

- Considero que en casos de fertilización con P para recuperar decididamente valores muy bajos en el suelo, el costo del mismo podría considerarse como inversión y ser amortizado en más de una campaña.

Propuestas para lograr una producción más sustentable, en todos sus ejes, de nuestro recurso suelo

A mi entender, el modelo productivo actual, desde lo ambiental, no es sostenible en el tiempo, hay descenso de los niveles de P por debajo de los umbrales recomendables, también, en muchos casos de los niveles de materia orgánica a pesar de estar en siembra directa, deterioro de las propiedades físicas del suelo con consecuencias sobre la infiltración y ascensos de napa de agua a nivel de superficie que cuando son de mala calidad deterioran fuertemente la capacidad de uso de los mismos, etc.

El suelo, de acuerdo a su uso y manejo puede ser renovable o no. Por lo tanto, en todos los ámbitos es prioritario pensar y actuar para el largo plazo.

En este contexto y considerando que el suelo es el principal capital de una empresa agropecuaria o propietario de un predio, realice o no la producción, y que también lo es de un país, es necesario generar acciones no sólo tranqueras adentro, sino también tranqueras afuera.

Como sociedad debemos pensar en la sostenibilidad, inclusión y desarrollo integral de las generaciones actuales y futuras, preservando el buen uso de nuestros recursos naturales y promoviendo políticas públicas tendientes a lograr ese objetivo.

La propiedad privada no debe ser pretexto para eludir la obligación de preservar y tampoco de no hacer un aprovechamiento pleno de todas sus potencialidades para generar producción (riqueza) y cubrir la demanda de intereses públicos.

A mi entender, hay dos hechos que están limitando el desarrollo armónico y sostenible de la producción. Los derechos de exportación que por un lado no dejan aplicar toda la tecnología o limitan la producción y la falta de una política pública de incentivo y estímulo a la producción y a las mejores prácticas de uso de los recursos naturales existentes.

Por tales motivos considero las siguientes propuestas:

Tranqueras adentro:

- El propietario de la tierra es el principal responsable en el cuidado de su bien principal, el suelo, por lo tanto todas las acciones que realice, ya sea en forma directa o a través de la tercerización de la producción son de su exclusiva responsabilidad
- En caso de tercerizar la producción, debe focalizarse no sólo en el rédito económico inmediato, sino, principalmente en la sostenibilidad futura, que se logra a partir de un manejo acorde a la potencialidad del ambiente específico

Tranqueras afuera:

- Mantener la fertilidad y productividad del recurso suelo debe ser una política de estado con incentivos hacia quienes la practican y de fuerte gravamen para quienes no la realicen.
- Tenemos que pensar que, en lugar de los derechos de exportación que graban la producción, debemos grabar la propiedad para, de acuerdo a estímulos, potenciar su uso y manejo con mejores prácticas. A modo de ejemplo los estímulos serán para quienes destinen el uso a praderas perennes, realicen balances de carbono positivos, siembra directa, buenas prácticas agrícolas, certificación de producción, etc.

Referencias

da Cunha J.F., E.A.B. Francisco, V.Casarin, y L.I. Prochnow. 2014. Balanço de Nutrientes na Agricultura Brasileira - 2009 a 2012. Informações Agrônomicas (Brasil). Número 145, Março 2014.

Darwich, N. 1983. Niveles de P asimilable en los suelos pampeanos. IDIA N° 409/412, p. 1-5.

Edis, R., R. Norton, y K. Dassanayake. 2012. Soil nutrient budgets of Australian natural resource management regions

Fixen, P. E., T.W. Bruulsema, T.L. Jensen, R.Mikkelsen, T. S. Murrell, S. B. Phillips, Q.Rund, y W. M. Stewart. 2010. The Fertility of North American Soils, 2010. Better Crops with Plant Food, Vol. 94, Issue No. 4, 2010.

García, F., y M.F. González Sanjuan. 2013. La nutrición de suelos y cultivos y el balance de nutrientes: ¿Cómo estamos? Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica. 9:2-7. IPNI Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.

NuGIS-IPNI. 2012. <http://nugis.ipni.net>

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. IPNI.

[volver al índice](#)

Reposición de nutrientes en el largo plazo ¿Qué nos dicen los números?

Adrián A. Correndo^{1,*}, Miguel Boxler², y Fernando O. García¹

¹IPNI Cono Sur; ²CREA Sur de Santa Fe

* Contacto: acorrendo@ipni.net; Av. Santa Fe 910, Acassuso, Buenos Aires, Argentina

Introducción

La fertilización de los cultivos de grano ha adoptado en las dos últimas décadas una especial relevancia en los sistemas de producción de la región pampeana argentina, donde los principales cultivos son soja [*Glycine max* (L.) Merr.] y maíz (*Zea mays* L.) en verano, y trigo (*Triticum aestivum* L.) en invierno. Para las gramíneas -maíz y trigo-, las recomendaciones de fertilización normalmente incluyen nitrógeno (N) y fósforo (P), y más recientemente azufre (S). En el caso de la soja, las recomendaciones se basan principalmente en la nutrición fosforada y recientemente azufrada, pero generalmente las dosis utilizadas son bastante menores respecto de las gramíneas.

Para facilitar la toma de decisiones, existen diferentes metodologías de diagnóstico mediante las cuales es posible estimar requerimientos, respuestas y/o probabilidad de respuesta a los nutrientes. Para todas ellas, la calibración local es una característica deseada para mejores recomendaciones. Sin embargo, la decisión de fertilización -tomada ex-ante- finalmente depende de aspectos económicos y financieros, donde las relaciones insumo:producto determinan una potencial rentabilidad de la práctica. En una instancia ex-post, normalmente se utilizan indicadores que estiman la eficiencia de uso de los nutrientes, siendo clásico el uso de la eficiencia agronómica

(kg respuesta kg⁻¹ nutriente aplicado), dada su utilidad para realizar cálculos económicos (Calviño y Redolatti, 2004; Pagani et al., 2008; Salvagiotti et al., 2011). Sin embargo, existen muy pocos antecedentes donde se analice el desempeño económico de tratamientos de fertilización en ensayos de largo plazo (Zentner y Campbell, 1988).

El uso de las herramientas de diagnóstico mencionadas constituye parte fundamental del desarrollo de las mejores prácticas de manejo (MPM) del uso de fertilizantes en función de características específicas de cada sitio (Bruulsema, 2008). Las MPM de la nutrición de cultivos son estratégicas para incrementar la productividad del sistema de forma sustentable. Este concepto es complejo, y consiste tanto de dimensiones económicas, como sociales y ambientales, que necesitan ser incluidas en las recomendaciones de manejo (IPNI, 2013). En este trabajo, se analizan algunos aspectos de la dimensión económica referidos al manejo de la nutrición nitrogenada, fosforada y azufrada en maíz, trigo y soja en experimentos de fertilización de largo plazo en la región pampeana central.

La red de nutrición de la región Crea Sur de Santa Fe

Desde el año 2000, CREA Sur de Santa Fe, IPNI Cono Sur y Agroservicios Pampeanos SA (ASP)

Tabla 1. Características básicas de los sitios evaluados y análisis de suelo al inicio de los ensayos (Campaña 2000/01). Red de Nutrición Región CREA Sur de Santa Fe.

Establecimiento	Balducchi	San Alfredo	La Blanca	La Hansa [†]	Lambaré
CREA	Teodelina	Santa Isabel	Gral. Baldissera	Amstrong-Montes de Oca	San Jorge – Las Rosas
Serie de suelo	Santa Isabel	Hughes	La Bélgica	Bustinza	Los Cardos
Tipo de suelo	Hapudol típico	Argiudol típico	Hapludol típico	Argiudol ácuico	Argiudol típico
MO (%)	2.6	4.8	2.6	3.5	2.8
pH	5.9	6.0	6.6	5.7	5.7
PBray-1 (mg kg ⁻¹)	11	12	16	45	68
Años de Agricultura	+60	15	6	+20	12
Rotación	M-T/Sj		M-Sj-T/Sj		

[†]Comenzó con soja de primera en la campaña 2001/02.

desarrollan en conjunto la Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe que consiste en ensayos de nutrición de cultivos en campo de productores de la región pampeana centro-norte (García et al., 2010). Esta red experimental se estableció con once ensayos bajo sistemas de siembra directa estabilizados, de los cuales en este trabajo se analizaron cinco sitios (Tabla 1). El período evaluado estuvo comprendido entre las campañas agrícolas 2000/01 y 2013/14 (14 años).

En cada sitio, con el objetivo de evaluar diferentes manejos y respuestas a la fertilización con N, P, y S, se disponen distintos tratamientos que se repiten de forma anual sobre las mismas parcelas (Tabla 2). La soja de primera no se fertiliza con N, mientras que la secuencia trigo/soja de segunda se maneja fertilizando a la siembra del trigo con dosis para ambos cultivos. Las fuentes de nutrientes son urea (46-0-0), fosfato monoamónico -FMA- (11-23-0), y yeso agrícola (0-0-0-19S) para N, P, y S, respectivamente. El diseño experimental de los ensayos es en bloques completos aleatorizados (DBCA), con tres repeticiones. Mayor información sobre el manejo de los ensayos está disponible en García et al. (2010).

Determinaciones

Para el análisis económico se consideraron el margen bruto (MB) de la fertilización (parcial y acumulado) y el retorno de la inversión (RI). En

ambos casos, la secuencia T/Sj se consideró como un solo cultivo.

Margen bruto de la fertilización

En cada campaña se evaluó la diferencia de producción de granos (kg ha⁻¹) entre cada tratamiento fertilizado (PS, NS, NP y NPS) y el Testigo absoluto. A partir de dichos valores, se estimó el margen bruto parcial por fertilización (MBP, US\$ ha⁻¹) como la diferencia entre los ingresos adicionales y los costos de fertilización de cada tratamiento (Ecuación 1):

$$MBP = [\Delta \text{Rendimiento} \times (PG - GC)] - [(Fa \times (CF + Cop)) + Ca]$$

Ecuación 1

- donde, MBP (US\$ ha⁻¹) = margen bruto;
- Δ Rendimiento (kg ha⁻¹) = rendimiento de tratamientos fertilizados (PS, NS, NP y NPS) – rendimiento del Testigo;
- PG (US\$ kg⁻¹) = precio del grano;
- GC (US\$ kg⁻¹) = gastos de comercialización;
- Fa (kg ha⁻¹) = fertilizante aplicado;
- CF (US\$ kg⁻¹) = costo del fertilizante;
- Cop (US\$ kg⁻¹) = costo de oportunidad del fertilizante; y
- Ca (US\$ ha⁻¹) = costo de aplicación del fertilizante.

Retorno de la inversión

Al cierre de la campaña 2013/14 se calculó un índice de retorno de la inversión (RI) como el co-

Tabla 2. Rangos de dosis aplicada de nutrientes a los cultivos de maíz, soja de primera y el doble cultivo trigo/soja de segunda en los cinco tratamientos establecidos en los sitios experimentales. Red de Nutrición Región CREA Sur de Santa Fe. Campañas 2000/01 a 2013/14.

Tratamiento	Testigo (T)	PS	NS [†]	NP [†]	NPS [†]
Nutrientes (kg ha ⁻¹)					
Maíz					
N	-	-	92-157	92-157	92-157
P	-	20-40	-	20-40	20-40
S	-	19-24	19-24	-	19-24
Soja de primera					
N	-	-	-	-	-
P	-	30	-	30	30
S	-	18-24	18-24	-	18-24
Trigo/Soja de segunda					
N	-	-	82-103	82-103	82-103
P	-	37-46	-	37-46	37-46
S	-	20-24	20-24	-	20-24

[†]En los cultivos de soja no se aplica N.

ciente entre los ingresos adicionales y los costos de fertilización acumulados de cada tratamiento (**Ecuación 2**):

$$RI = \Delta \text{ Ingresos acumulados} / \Delta \text{ Costos acumulados}$$

Ecuación 2

donde, RI (US\$ US\$⁻¹) = retorno de inversión;

Δ Ingresos acumulados (US\$ ha⁻¹) = Σ ingresos de tratamientos fertilizados respecto del Testigo;

Δ Costos acumulados (US\$ ha⁻¹) = Σ costos de tratamientos fertilizados.

En todos los casos, con el objeto de contemplar las variaciones en las relaciones grano:fertilizante y el valor monetario, los precios utilizados fueron los correspondientes a la serie histórica entre las campañas 2000/01 a 2013/14, expresados en US\$ constantes al 31 de Diciembre de 2013 (INDEC, 2014; FMI, 2014). Las series se elaboraron en base a las cotizaciones de maíz, trigo y soja “Rosario disponible”, y de los fertilizantes (urea, fosfato monoamónico y sulfato de calcio) (Agromercado, 2014; Márgenes Agropecuarios, 2014). El precio de los granos se ajustó descontando gastos de comercialización (fletes corto y largo a Rosario, secado, acopio, paritaria, zarandeo, impuestos y sellado), y al costo del fertilizante se adicionó un interés por inmovilización igual a la tasa vigente por depósito en plazo fijo (BCRA, 2014) más el costo de aplicación.

Los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas se evaluaron mediante métodos gráficos y estadísticos. Dada la heterogeneidad de sitios, los análisis de varianza de la producción acumulada de granos, el MBP y el RI se estudiaron dentro de cada sitio. En el caso del MBP de cada tratamiento, se utilizó un modelo con medidas repetidas en el tiempo con una estructura de correlación auto-regresiva de orden 1 (AR1) como el modelo más parsimonioso según el criterio de información de Akaike (AIC). Los análisis estadísticos se realizaron mediante el paquete Infostat versión 2013 (Di Rienzo et al., 2013).

Producción de granos

La producción acumulada de granos de maíz, trigo y soja, mostró importantes variaciones en función del sitio y los tratamientos de fertilización (**Figura 1**). En general, los cultivos de maíz y trigo fueron los que más respuesta relativa a la

fertilización registraron para N y P. Los cultivos de soja de primera y de segunda, manifestaron las mayores respuestas a S. Las variaciones entre sitios en cuanto a las respuestas, dependieron de la disponibilidad de nutrientes en el suelo, la historia del lote y el nivel de rendimiento de los cultivos (García et al., 2010). En todos los sitios, los mayores niveles de producción se alcanzaron con el tratamiento sin limitaciones (NPS) y los más bajos con el Testigo. En ambos tratamientos contrastantes, los niveles más altos de producción se lograron en el sitio San Alfredo (143.1 y 91.1 t ha⁻¹ para NPS y Testigo, respectivamente). Las diferencias más importantes se observaron en el sitio Balducchi (M-T/Sj) donde el Testigo registró una producción acumulada de 57.7 t ha⁻¹ y el tratamiento NPS 129.9 t ha⁻¹ (+125%), mientras las diferencias más atenuadas se registraron en el sitio Lambaré (M-Sj-T/Sj), donde el tratamiento NPS no se diferenció de NS y NP, y resultó 10% y 27% superior a los tratamientos PS y Testigo, respectivamente. Esta condición se refleja en los análisis de suelos de cada sitio, donde se observa que Balducchi y Lambaré fueron los sitios de la Red más y menos degradados, respectivamente (García et al., 2010).

Bajo rotación M-T/Sj, las mayores diferencias comparativas entre sitios se registraron en la producción del tratamiento Testigo. En Balducchi, la producción de granos sin fertilización (especialmente en maíz) fue menor respecto de San Alfredo, dada su condición de menor fertilidad inicial (**Figura 1, Tabla 1**). Por otro lado, en Balducchi los cultivos de maíz y trigo respondieron en la misma magnitud a la falta de N (-40%); mientras que trigo y soja de segunda fueron los cultivos que más evidenciaron la falta de P (-32%) y S (-30%), respectivamente. En San Alfredo, el cultivo de trigo fue el que más respondió en producción por fertilización nitrogenada (-26%) y fosforada (-29%); mientras que la soja de segunda fue el cultivo que manifestó en mayor medida la falta de S (-13%).

Bajo rotación M-Sj-T/Sj, la producción de granos sin limitaciones fue similar para los cuatro cultivos en los tres sitios. Cabe destacar que la menor producción acumulada del sitio La Hansa se debe principalmente a que el sitio cuenta con un cultivo de maíz menos dado que el ensayo comenzó en la campaña 2001/02 con el cultivo de soja de primera (**Figura 1**). La producción de

granos acumulada en el Testigo fue mayor en Lambaré respecto de los otros dos sitios, reflejando una mejor condición de fertilidad inicial debida, en parte, a su historia agrícola más reciente que además incluía rotación con pasturas. Por otra parte, en La Blanca los nutrientes más limitantes fueron N en maíz (-17%), P en trigo (-23%) y S en soja de primera (-14%). En La Hansa, el cultivo más limitado por nutrición fue maíz por omisión de N (-36%), S (-20%) y P (-13%). En Lambaré, la principal limitante se observó en maíz por omisión de N (-14%), mientras que, en menor medida, la omisión de P afectó principalmente a trigo (-6%) y la de S a soja de segunda (-3%).

Margen por fertilización

Durante el período analizado, las relaciones de precios registraron altibajos que generaron momentos más y menos favorables para la inversión en fertilizantes (Figura 2). Las relaciones de precios (kg grano para comprar 1 kg de nutriente) de los granos con N, P y S variaron 29%, 37%, y 24% para trigo, y 22%, 34%, y 13% para maíz. Por su parte, para soja variaron 39% y 21% para P y S, respectivamente. Estas variaciones, mayores para el caso de P, se relacionan principalmente con el alza de precios de los fertilizantes debida a la crisis financiera internacional de 2008-2009,

que se normalizó en las campañas siguientes.

La inversión total realizada en fertilizantes en las 14 campañas según las diferentes estrategias de fertilización fue de: 2094, 2374, 3579 y 3965 US\$ ha⁻¹ para los tratamientos PS, NS, NP y NPS, respectivamente, en los sitios con rotación M-T/Sj (Balducchi y San Alfredo); y de 1920, 1694, 2761 y 3129 US\$ ha⁻¹ para los tratamientos PS, NS, NP y NPS, respectivamente, en los sitios bajo rotación M-Sj-T/Sj (La Blanca, La Hansa y Lambaré). El resultado de esta inversión, evaluado como MBP anual, varió entre -255 y 1202 US\$ ha⁻¹ año⁻¹, según cultivo, tratamiento, sitio, condiciones climáticas, incidencia de enfermedades, y relaciones de precios de cada campaña que recibieron fertilización, en un 74% de los casos se obtuvo ganancia. La frecuencia media de MBP positivos fue de 71%, 78%, 67% y 74%, para los tratamientos PS, NS, NP y NPS, respectivamente. En los sitios más degradados en fertilidad como Balducchi, la frecuencia de MBP positivos fue superior respecto de sitios menos degradados como Lambaré. Por ejemplo, la fertilización NPS en Balducchi generó MBP mayores a US\$ 100 en más del 86% de los casos, mientras que en Lambaré solo se logró en el 15% de los casos.

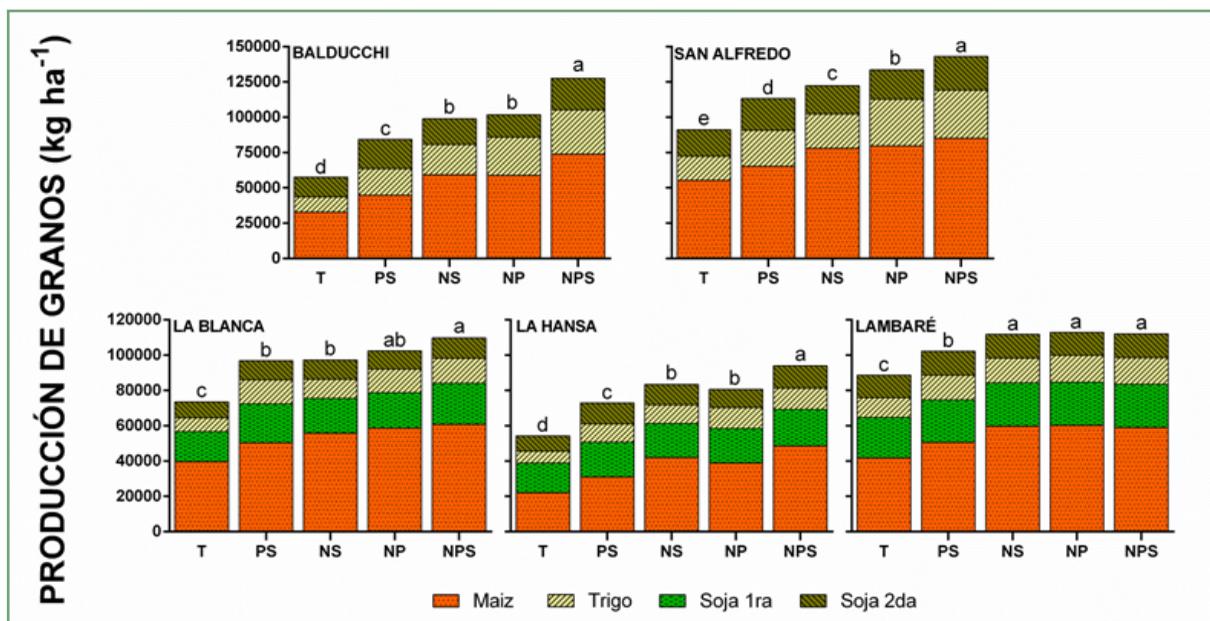


Figura 1. Producción acumulada de granos para los diferentes tratamientos de fertilización en los cinco sitios evaluados. Campañas 2000/01 a 2013/14 (Balducchi, San Alfredo, La Blanca, y Lambaré) y 2001/02 a 2013/14 (La Hansa). Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de un mismo sitio, según Tukey al 5%.

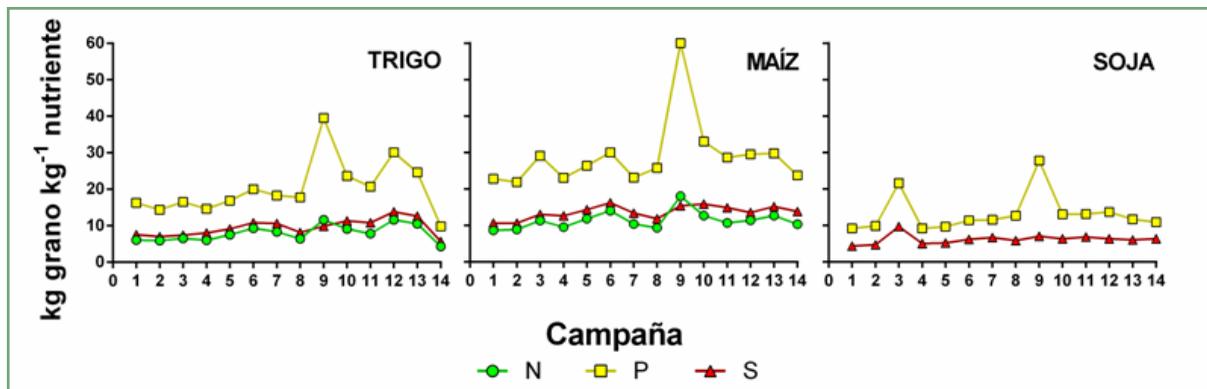


Figura 2. Serie histórica de las relaciones de precios (kg grano kg⁻¹ nutriente) registradas entre las campañas 2000/01 (1) y 2013/14 (14) para trigo, maíz y soja. Las fuentes consideradas fueron: urea para N, fosfato monoamónico para P, y sulfato de calcio para S. Las relaciones de precios promedio del período fueron: 7.9, 20.2 y 9.5 kg de trigo por kg de N, P y S, respectivamente; 11.4, 29.2 y 13.7 kg de maíz por kg de N, P y S, respectivamente; y 13.2 y 6.2 kg de soja por kg de P y S, respectivamente. Fuente: elaboración propia en base a datos publicados por Agromercado y Márgenes Agropecuarios.

En los sitios bajo rotación M-T/Sj, los MBP obtenidos en maíz y el doble cultivo trigo/soja de segunda, generalmente resultaron similares entre sitios, y el tratamiento NPS fue el de mejor comportamiento. En el global de los años, el segundo mejor tratamiento para maíz fue NS, y para el doble cultivo T/Sj fue PS. Estas diferencias entre maíz y el doble cultivo, respectivamente, indican por un lado el mayor potencial de respuesta a N del maíz y a P del doble cultivo, y por otro, la importancia del S para ambos cultivos. Para los

sitios en rotación M-Sj-T/Sj, en general, el maíz fue el cultivo con mayores MBP, a excepción de La Blanca, donde la soja de primera generó mejores resultados en las últimas campañas. En este sitio, la tendencia de MBP crecientes en soja de primera es la más notoria entre todos los sitios (datos no mostrados).

Adicionalmente, se observó que aquellos tratamientos donde las gramíneas de la rotación recibieron N (NPS) registraron mayores rendimientos,

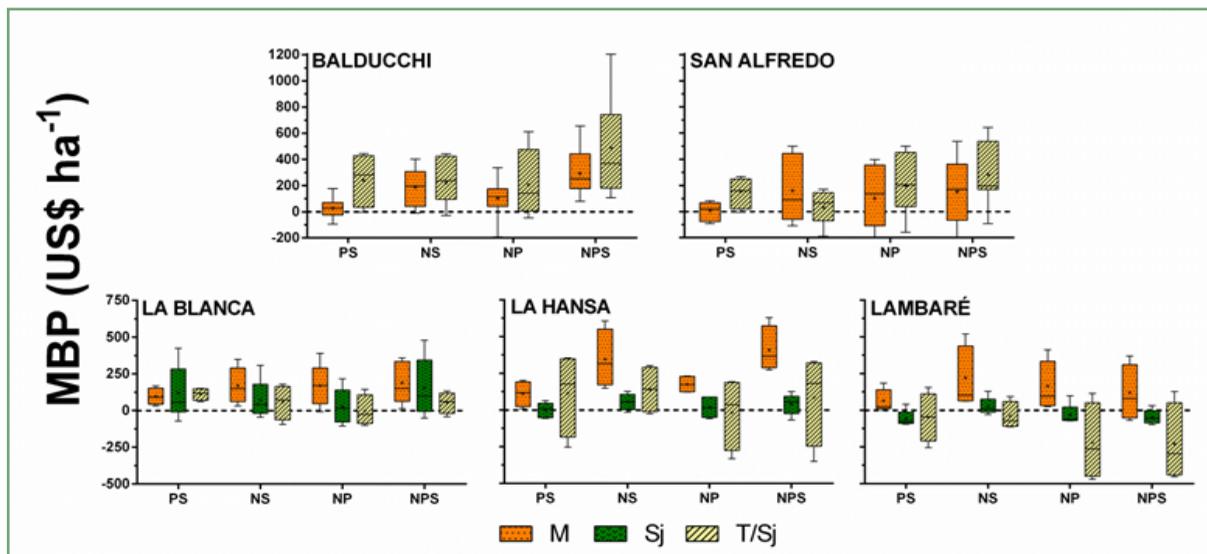


Figura 3. Margen bruto parcial (MBP, US\$ ha⁻¹) respecto del testigo no fertilizado (línea punteada en cero) para los diferentes tratamientos de fertilización en los cinco sitios evaluados. Las cajas indican los percentiles 25, 50 y 75, las cruces indican la media, y las barras verticales los valores extremos. Campañas 2000/01 a 2013/14. Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe.

y por tanto, mayores MBP en soja de primera (La Blanca y La Hansa) y soja de segunda (Balducchi y San Alfredo) respecto del tratamiento sin N en las gramíneas previas (PS) (Figura 3). Estos resultados podrían ser explicados, en parte, por un mayor volumen y calidad de rastrojo producido con el tratamiento NPS. Por un lado aportaría más N, y por otro, durante las primeras etapas del cultivo de soja, más biomasa de rastrojos también podría inmovilizar más N y transferirlo hacia etapas más avanzadas. Esto reduciría los riesgos de un potencial efecto negativo inicial de la disponibilidad de N en el suelo sobre el proceso de fijación biológica (FBN), y aportaría parte del N que la FBN no alcanza a cubrir (Collino et al., 2015; Salvagioti et al., 2008).

Luego de catorce campañas agrícolas, los mayores MBP acumulados por fertilización se registraron en los sitios bajo rotación M-T/Sj (Figura 4), principalmente debido a la mayor proporción de maíz y menor de soja respecto de la rotación M-Sj-T/Sj. Maíz y soja son los cultivos que más y menos respondieron a la fertilización, y que más y menos inversión en fertilizantes registraron, respectivamente. En el sitio Balducchi (con mayor historia de agricultura continua y más degradado),

los márgenes acumulados fueron de 1849, 2873, 2162 y 5484 US\$ ha⁻¹ para los tratamientos PS, NS, NP y NPS, respectivamente. Para los mismos tratamientos, los márgenes acumulados en San Alfredo fueron de 1127, 1345, 2079 y 3042 US\$ ha⁻¹, respectivamente. En Balducchi, el margen por fertilización comenzó a diferenciarse entre tratamientos a partir de la segunda campaña y, a partir de la sexta, el beneficio acumulado del manejo NPS comenzó a ser notoriamente superior al resto. En San Alfredo, comenzaron a registrarse diferencias significativas a partir de la sexta cosecha y, desde la octava campaña, el tratamiento NPS fue claramente superior al resto.

Por otra parte, los sitios bajo rotación M-Sj-T/Sj, presentaron márgenes acumulados por fertilización relativamente menores respecto de la rotación M-T/Sj (Figura 4). El sitio La Blanca registró márgenes acumulados por 1540, 1443, 978, y 1937 US\$ ha⁻¹ para PS, NS, NP y NPS, respectivamente. Para los mismos tratamientos, en La Hansa (con una campaña menos) se obtuvieron beneficios por 894, 2221, 725 y 2173 US\$ ha⁻¹, y en Lambaré los márgenes fueron de -149, 1081, -211 y -559 US\$ ha⁻¹, respectivamente. En estos dos últimos sitios, el tratamiento NS registró los

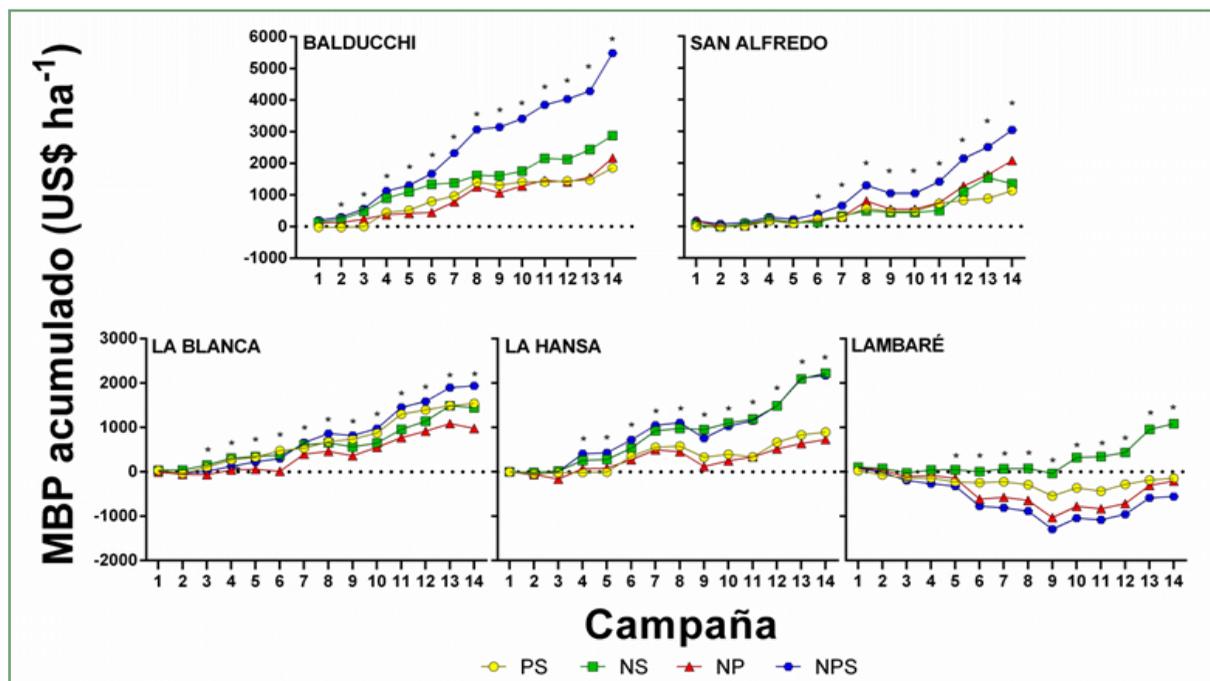


Figura 4. Margen bruto parcial (MBP) acumulado (US\$ ha⁻¹) respecto del testigo no fertilizado (cero) para los diferentes tratamientos de fertilización en los cinco sitios evaluados. Campañas 2000/01 a 2013/14. Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe. Las barras indican el error estándar. Asteriscos indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de un mismo sitio y campaña, según Tukey al 5%.

mejores MBP dada la baja respuesta a P debido a los altos niveles de P_{Bray-1} en el suelo. En la Hansa, el tratamiento NS obtuvo MBP muy similares a NPS desde la tercera campaña. Por otro lado, en Lambaré todos los tratamientos comenzaron a generar MBP positivos a partir de la décima campaña –acusando agotamiento de fertilidad–, pero el tratamiento NS resultó el único con MBP acumulado positivo al final del período evaluado.

La decisión de adoptar una práctica de manejo, en este caso la fertilización, se asocia a un riesgo de pérdida así como la decisión contraria a un riesgo de ganancia no percibida, o lucro cesante. Los MBP acumulados de los tratamientos más redituables en cada sitio indican que, respecto de un manejo sin fertilización (Testigo), además de degradar progresivamente la fertilidad del suelo, en el período evaluado el productor tuvo lucros cesantes por 392, 217, 138, 171, y 77 US\$ ha⁻¹ año⁻¹ en Balducchi, San Alfredo, La Blanca, La Hansa, y Lambaré, respectivamente. En este sentido, las MPM de la nutrición de cultivos –como, por ejemplo, el uso del análisis de suelos como herramienta de diagnóstico para mantener una fertilización balanceada– aportan a disminuir tanto el riesgo de pérdida como el de lucro cesante.

A nivel de nutriente, N y S tuvieron un mayor impacto relativo sobre el MBP respecto de la aplicación de P (Tabla 3). Mientras Balducchi y San Alfredo (M-T/Sj) manifestaron mayor respuesta económica a la fertilización con N, La Blanca, La Hansa y Lambaré (M-Sj-T/Sj) manifestaron mayor impacto económico por la fertilización con S. En el primer caso, el mayor impacto de N puede relacionarse a la mayor presencia de gramíneas en la rotación M-T/Sj. En el segundo, la mayor respuesta económica a S puede estar relacionada a la mayor proporción de soja en la rotación (Martínez y Cordone, 2000; 2003; Díaz Zorita et al., 2002; Salvagiotti et al., 2005; Gutiérrez Boem et al., 2007).

Retorno de la inversión en fertilización

El retorno de inversión (RI) en fertilización también marcó diferencias importantes entre sitios y tratamientos (Figura 5). En Balducchi, los manejos con mayor índice de retorno fueron NPS (2.38 US\$ US\$⁻¹), NS (2.21 US\$ US\$⁻¹), seguidos de PS (1.88 US\$ US\$⁻¹) y NP (1.60 US\$ US\$⁻¹). En San Alfredo, con un RI medio de 1.61 US\$ US\$⁻¹, no

se detectaron diferencias entre tratamientos. En La Blanca, se determinaron diferencias significativas entre NP (1.35 US\$ US\$⁻¹) respecto de PS (1.80 US\$ US\$⁻¹) y NS (1.85 US\$ US\$⁻¹), mientras que NPS (1.62 US\$ US\$⁻¹) no se diferenció de ningún tratamiento. En La Hansa, el tratamiento NS registró el mayor retorno (2.37 US\$ US\$⁻¹) seguido de NPS, PS, y NP con 1.72, 1.48, y 1.27 US\$ US\$⁻¹, respectivamente. En Lambaré, el sitio de mejores condiciones iniciales de fertilidad, solo resultó rentable el tratamiento NS (1.64 US\$ US\$⁻¹), mientras que el resto de los tratamientos registró un RI medio de 0.89 US\$ US\$⁻¹ invertido. Estos resultados, indican que la rentabilidad media de la práctica en Lambaré, con un manejo nutricional razonable dados los altos niveles de P en el suelo, fue de un 64%.

La fertilización con S fue la que mejor pagó la inversión en fertilización en la rotación (Tabla 3), relacionado al bajo costo relativo de las fuentes de S y a la creciente respuesta de los cultivos a la fertilización azufrada. Esta tendencia creciente de casos con respuesta a la aplicación de S en cultivos extensivos se ha documentado extensamente para la región pampeana desde finales de la década de los '90 (Martínez y Cordone, 2000 y 2003; Díaz Zorita et al., 2002; Salvagiotti et al., 2005; Reussi Calvo et al., 2006; Gutiérrez Boem et al., 2007; Pagani et al., 2009). La respuesta

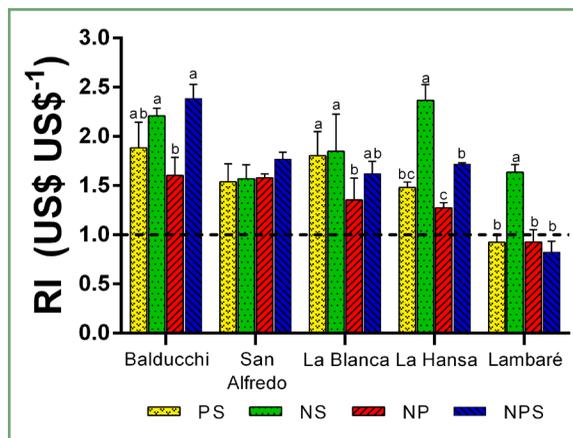


Figura 5. Retorno medio de inversión (US\$ US\$⁻¹ invertido) para los diferentes tratamientos de fertilización en los cinco sitios evaluados. Campañas 2000/01 a 2013/14. Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe. La línea punteada horizontal indica el umbral de indiferencia. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de un mismo sitio, según Tukey al 5%.

esperada en rendimiento para trigo, maíz y soja en la región pampeana es de alrededor del 10% (Steinbach y Álvarez, 2014). Esta condición sumada a que el S es un nutriente acompañante en la formulación de varias fuentes fosforadas y nitrogenadas, y que las fuentes como yeso agrícola o S elemental poseen un bajo costo, hacen de la fertilización azufrada una interesante inversión.

La fertilización fosforada, por su parte, impactó en menor medida sobre el MBP de la rotación y registró los menores niveles de RI (Tabla 3). Es importante destacar que las dosis de P aplicadas fueron de reposición más un 5-10%, aun en situaciones de alto nivel de P Bray (García et al., 2010). En estas condiciones, las respuestas fueron muy bajas en ensayos con alto P Bray inicial como los de Lambaré y La Hansa, para los cuales no se hubiera recomendado fertilización fosfatada en condiciones de producción comercial. Sin embargo, es pertinente destacar que la omisión o no de P (u otro nutriente) implica un costo/beneficio “oculto” (o internalidad) correspondiente al empobrecimiento o construcción de los niveles del nutriente en el suelo que generalmente no es considerado en las evaluaciones económicas de los programas de fertilización (Viglizzo et al., 2011; Cordone y Trossero, 2012; Sutton et al., 2013).

Otras experiencias de largo plazo

En forma similar a la Red de Nutrición del CREA Sur de Santa Fe, otros ensayos similares conducidos con enfoques de largo plazo, arrojan resultados más que interesantes en materia económica de la práctica de fertilización.

Sudeste de Córdoba

Desde la campaña 1999/00, INTA Marcos Juárez, Aapresid, Agro-Servicios Pampeanos e IPNI Cono Sur llevan a cabo dos experiencias de fertilización a largo plazo en los establecimientos “Don Osvaldo” y “Los Chanaritos” del productor Hugo Ghio en la zona de Corral de Bustos y Camilo Aldao (Córdoba), respectivamente. Los ensayos comprenden 6 tratamientos diferentes de fertilización en un esquema de rotación M-T/Sj (Tabla 4, ver detalles en Ghio et al., 2010).

En este ensayo, los tratamientos con N, P y S acumularon un beneficio similar hasta la octava campaña, a partir de la cual la mayor inversión relativa del tratamiento de reposición (NPSr, Tabla 4) combinada con una serie de campañas con sequía y relaciones de precios menos favorables, se tradujo en un mayor margen y retorno para NPS por suficiencia (Figura 6). Por otra parte, en

Tabla 3. Diferencia en margen bruto parcial (MBP, US\$ ha⁻¹) acumulado entre el tratamiento sin limitaciones nutricionales (NPS) y aquellos con omisión de nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) a lo largo de la rotación; y retorno de inversión (RI, US\$ US\$⁻¹) para cada nutriente en los cinco sitios evaluados. Campañas 2000/01 a 2013/14. Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe.

Sitio	MBP (US\$ ha ⁻¹)			RI (US\$ US\$ ⁻¹)		
	N	P	S	N	P	S
Balducchi	3635	2611	3323	3.53	2.90	11.63
San Alfredo	1915	1697	963	1.35	1.38	2.33
La Blanca	397	494	959	1.33	1.34	3.60
La Hansa	1279	-48	1448	2.10	0.97	5.14
Lambaré	-400	-1542	-282	0.66	-0.15	0.17

Tabla 4. Rangos de dosis aplicada de nutrientes a los cultivos de maíz y trigo/soja de segunda en los seis tratamientos. Ensayo de Nutrición de Largo Plazo Establecimiento Don Osvaldo. Campañas 1999/00 a 2013/14. Las letras “s” y “r” indican que los nutrientes se manejaron según criterios de diagnóstico para suficiencia y reposición, respectivamente. Adaptado de Ghio et al. (2010).

Tratamiento	Testigo	Ss	Ns	NPs	NPSs	NPSr
	Nutrientes (kg ha ⁻¹)					
N	-	-	60-80	60-80	60-80	140-250
P	-	-	-	12-20	12-20	30-60
S	-	10-20	-	-	10-20	20-30

términos económicos, el S resultó ser el nutriente más destacado: aplicar solo S (Ss) registró un beneficio acumulado de 3154 US\$ ha⁻¹ y un retorno de US\$ 8.97 por cada US\$ invertido. Sin embargo, aplicar S sobre una base de N y P (NPS vs. NPd), generó un beneficio de 3707 US\$ ha⁻¹ con un retorno de US\$ 9.44 por cada US\$ invertido en S.

Norte de Buenos Aires

Desde la campaña 2006/07, INTA Pergamino, con el patrocinio de Profertil, lleva a cabo un ensayo de nutrición a largo plazo en la localidad de Arribeños, partido de General Arenales (Buenos Aires) (Ferraris et al. 2012 y 2015). Los tratamientos representan 5 estrategias de fertilización bajo un esquema de rotación M-Sj-T/Sj-Ce/Sj (ver más detalles en Ferraris et al., 2012 y 2015). Este experimento se caracteriza por contar, además de un testigo absoluto, con un tratamiento denominado “tecnología de uso actual” el cual pretende emular la estrategia más utilizada por el productor medio de la zona. Referido a la rentabilidad de la práctica de fertilización, este tratamiento aporta a la noción de cuán lejos se encuentra la adopción de la tecnología tanto de la estrategia más austera (testigo) o de la más ambiciosa de reponer nutrientes y reconstruir niveles de fertilidad. Los resultados económicos de este ensayo muestran que si bien la inversión media del productor en nutrientes resulta menor, también los ingresos y la rentabilidad lo son. Así, las estrategias más ambiciosas incrementan la inversión en fertilizante, pero al mismo ritmo que incrementan los ingresos y la rentabilidad (Figura 7).

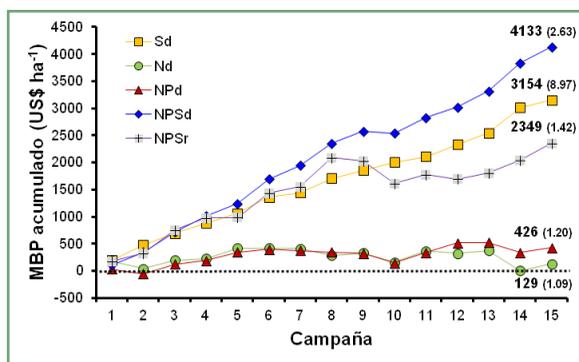


Figura 6. Margen bruto parcial acumulado (MBP, US\$ ha⁻¹) respecto del testigo no fertilizado (línea punteada en cero) para diferentes tratamientos de fertilización y sus respectivos retornos de inversión (valor entre paréntesis). Establecimiento Don Osvaldo. Campañas 1999/00 a 2013/14.

Conclusiones

- El análisis de experimentos de largo plazo, como los expuestos en este artículo, propone un enfoque alternativo al tradicional en materia económica de la inversión en fertilización. Si bien los tratamientos experimentales pueden no representar de manera estricta situaciones agrícolas de coyuntura, si representan un gradiente de escenarios donde es posible analizar el efecto del manejo de la nutrición de cultivos sobre la evolución de variables edáficas, productivas y, como en este caso, económicas.
- En general, las mayores ganancias acumuladas se obtuvieron con las estrategias de fertilización más ambiciosas, que además influyeron positivamente sobre los niveles de fertilidad del suelo. Sin embargo, las combinaciones de disponibilidad de nutrientes en el suelo, la historia del lote y el nivel de rendimiento de los cultivos determinaron resultados específicos en cada experiencia. En este sentido, reafirmamos la utilidad del análisis de suelo como herramienta de diagnóstico periódica, para saber dónde estamos y hacia dónde vamos con las estrategias de fertilización que utilizamos. Por ej. en el caso del P, donde es posible analizar residualidad en el suelo, se puede valorizar tanto el agotamiento como la construcción de fertilidad fosforada.
- Destacamos la inclusión de S en el manejo nutricional de los cultivos debido al bajo costo relativo de la fertilización azufrada y a los altos

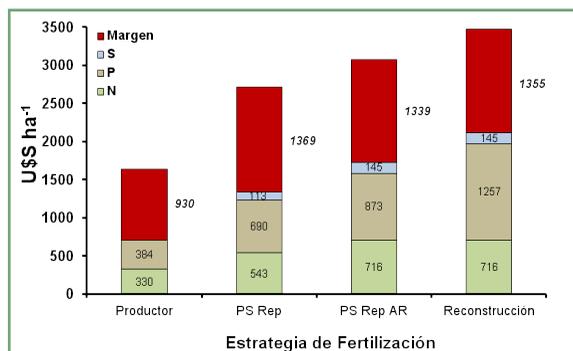


Figura 7. Ingreso adicional (US\$ ha⁻¹) respecto del tratamiento sin fertilizar (testigo) y sus componentes de inversión en fertilizantes nitrogenados, fosforados, azufrados y el margen de la fertilización. Valores expresados en US\$ con precios de insumos, cereal y gastos de comercialización actualizados a noviembre de 2014. Ensayo de larga duración, Arribeños, General Arenales. Campañas 2006/07 a 2013/14. Adaptado de Ferraris et al. (2015).

RI observados, dada la creciente y cada vez más generalizada respuesta al nutriente.

- Como valor de la tecnología en los casos estudiados, la fertilización con N, P y S generó ganancias de hasta 392 US\$ ha⁻¹ y retornos de hasta 3.53, 2.90 y 11.63 US\$ US\$⁻¹ invertido en fertilizantes nitrogenados, fosforados y azufrados, respectivamente. Sumado a la degradación del recurso suelo, esto ratifica como aspecto clave la necesidad de un correcto manejo de la nutrición de los cultivos pensando en sistemas de producción sustentables.
- Es importante mencionar que los resultados presentados de estas experiencias, no valorizan económicamente las dos clases presentes de internalidades para la empresa agropecuaria: i) por un lado la pérdida de nutrientes, en el caso de dosis menores que las de reposición; y ii) por otro lado tampoco valorizan el mantenimiento y reconstrucción de los niveles de fertilidad.

Agradecimientos

A todos los productores, asesores técnicos y personal de la Región CREA Sur de Santa Fe, y a Agroservicios Pampeanos (ASP) por su apoyo continuo a la Red de Nutrición.

Bibliografía

Agromercado. 2014. Series históricas. <http://www.agromercado.com.ar/?economico>

BCRA. 2014. Estadísticas monetarias y financieras. (Banco Central de la República Argentina). Disponible en: <http://www.bcra.gov.ar/index.asp>

Bruulsema, T.W., C. Witt, F.O. García, S. Li, T.N. Rao, F. Chen, y S. Ivanova. 2008. A Global Framework for Fertilizer BMPs. *Better Crops* 92 (2): 13-15. IPNI. Norcross, EE.UU.

Calviño, P.A., y M. Redolatti. 2004. Respuesta al agregado de fósforo en el cultivo de soja en el sudeste de Buenos Aires. I: Elementos de diagnóstico. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 22 a 24 de Junio, Paraná, Entre Ríos. Actas Cd-Rom.

Ciampitti, I.A., F.O. García, L.I. Picone, y G. Rubio. 2011a. Phosphorus: balance and soil extractable dynamics in field crops rotations in Pampean soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75:131-142.

Ciampitti, I.A., L.I. Picone, G. Rubio, y F.O. García. 2011b. Pathways of phosphorous fraction dynamics in field crop rotations of the Pampas of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 75: 3: 918-926

Collino, D., F. Salvagiotti, A. Peticari, C. Piccinetti, G. Ovando, S. Urquiaga, y R.W. Racca. 2015. Biological nitrogen fixation in soybean in Argentina: relationship

with crop, soil, and meteorological factors. *Plant Soil*, April 2015. DOI: 10.1007/s11104-015-2459-8

Cordone G. y M. Trossero. 2012. Costo oculto privado y social del sistema productivo: La degradación del suelo pampeano. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*. IPNI Cono Sur. Acaassuso, Buenos Aires. 7: 2-5.

Díaz Zorita, M., F.O. García, y R. Melgar. 2002. Fertilización en soja y trigo-soja. Respuesta a la fertilización en región pampeana. *Boletín Proyecto Fertilizar*. EEA INTA Pergamino. 44 pag.

Di Rienzo, J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, y C.W. Robledo. InfoStat versión 2013. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Echeverría, H., C. Navarro, y F. Andrade. 1992. Nitrogen nutrition of wheat following different crops. *J. Agric. Sci. (Cambridge)* 118:157-163.

Ferraris, G., F. Salvagiotti, P. Prystupa, y F.H. Gutiérrez Boem. 2004. Disponibilidad de azufre y respuesta de la soja de primera a la fertilización. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná.

Ferraris G.N., M. Toribio, R. Falconi, y L. Couretot. 2012. Efectos de diferentes estrategias de fertilización sobre los rendimientos, el balance de nutrientes y su disponibilidad en los suelos en el largo plazo. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*. IPNI Cono Sur. Acaassuso, Buenos Aires. 6: 2-6.

Ferraris G.N., M. Toribio, R. Falconi, y L. Couretot. 2015. Efectos de diferentes estrategias de fertilización sobre los rendimientos, el balance de nutrientes y su disponibilidad en los suelos en el largo plazo. *Actas CD Simposio Fertilidad 2015 "Nutriendo los suelos para las generaciones del futuro"*. Rosario, 19-20 Mayo 2015. IPNI Cono Sur-Fertilizar AC.

García, F.O., M. Boxler, J. Minteguiaga, R. Pozzi, L. Firpo, I. Ciampitti, A. Correndo, F. Bauschen, A. Berardo, y N. Reussi Calvo. 2010. La Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe. 2a Ed. Buenos Aires, AACREA. 2010. 64 pp.

Ghio, H., V. Gudelj, G. Espoturno, M. Boll, J. Bencardini, y F.O. García. 2010. Long-term on-farm demonstrations in the Central Pampas of Argentina: A Case Study. *Better Crops With Plant Food*. International Plant Nutrition Institute. 94 (1): 28-31.

Gutiérrez Boem, F.H., P. Prystupa, y G.N. Ferraris. 2007. Seed Number and Yield Determination in Sulfur Deficient Soybean Crops. *Journal of Plant Nutrition*, 30: 93-104.

IMF. 2014. International Monetary Found. United States and the IMF. <http://www.imf.org/external/country/USA/index.htm>

INDEC. 2014. Índices de precios. http://www.indec.mecon.ar/principal.asp?id_tema=10

IPNI. 2013. 4R de la Nutrición de Plantas: Un Manual para Mejorar el Manejo de la Nutrición de Plantas. Bruulsema TW; P Fixen; & G Sulewski (Eds.). 1ra Ed. Acaassuso. International Plant Nutrition Institute. 140 pp.

- Márgenes Agropecuarios.** 2014. Estadísticas. <http://www.margenes.com/estadistica/>
- Martínez, F., y G. Cordone.** 2000. Avances en el manejo de azufre: Novedades en respuesta y diagnóstico en trigo, soja y maíz. In Jornada de Actualización Técnica para Profesionales "Fertilidad 2000". INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Martínez, F., y G. Cordone.** 2003. Fertilización en soja de primera y en trigo-soja de segunda en la región pampeana norte. En: Satorre E. (ed.). El Libro de la Soja. SEMA. Buenos Aires, Argentina.
- Pagani, A, H.E. Echeverría, H.R. Sainz Rozas, y P.A. Barbieri.** 2008. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 26(2):183-193.
- Pagani, A, H.R. Sainz Rozas, y H.E. Echeverría.** 2009. Respuesta a nitrógeno y azufre en el cultivo de maíz en diferentes ambientes de la provincia de Buenos Aires. *Ciencia del Suelo* 27(1):21-29.
- Reussi Calvo, N.I., H.E. Echeverría, y H.R. Sainz Rozas.** 2006. Respuesta del cultivo de trigo al agregado de azufre en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 24(1):77-87.
- Salvagiotti, F., G. Gerster, S. Bacigaluppo, J. Castellarin, C. Galarza, N. González, V. Gudelj, O. Novello, H. Pedrol, y P. Vallote.** 2005. Efectos residuales y directos de fósforo y azufre en el rendimiento de soja de segunda. *Ciencia del Suelo* 22(2):92-101.
- Salvagiotti, F., K.G. Cassman, J.E. Specht, D.T. Walters, A. Weiss, y A. Dobermann.** 2008. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: a review. *Field Crop Res.*, 108:1-13.
- Salvagiotti, F., J. Castellarín, F. Ferraguti, y H. Pedrol.** 2011. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz según potencial de producción y disponibilidad de nitrógeno en la región pampeana norte. *Ciencia del Suelo* 29 (2): 199-212.
- Steinbach, H., y R. Álvarez.** 2014. Eficiencia de respuesta de trigo, maíz y soja a la fertilización azufrada en la región pampeana argentina. *Informaciones Agro-nómicas de Hispanoamérica.* IPNI Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires. 13: 11-17.
- Sutton, M.A., A. Bleeker, C.M. Howard, M. Bekunda, B. Grizzetti, W. de Vries, H.J.M. van Grinsven, Y.P. Abrol, T.K. Adhya, G. Billen, E.A. Davidson, A. Datta, R. Diaz, J.W. Erisman, X.J. Liu, O. Oenema, C. Palm, N. Raghuram, S. Reis, R.W. Scholz, T. Sims, H. Westhoek, y F.S. Zhang; with contributions from Ayyappan S, Bouwman AF, Bustamante M, Fowler D, Galloway JN, Gavito ME, Garnier J, Greenwood S, Hellums DT, Holland M, Hoysall C, Jaramillo VJ, Klimont Z, Ometto JP, Pathak H, Ploq Fichelet V, Powlson D, Ramakrishna K, Roy A, Sanders K, Sharma C, Singh B, Singh U, Yan XY, e Y. Zhang Y.** 2013. Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution. *Global Overview of Nutrient Management.* Centre for Ecology and Hydrology, Edinburgh on behalf of the Global Partnership on Nutrient Management and the International Nitrogen Initiative.
- Viglizzo, E.F., F.C. Frank, L.V. Carreño, E.G. Jobbagy, H. Pereyra, J. Clatt, D. Pincén, y F.M. Ricard.** 2001. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biology* 17: 959-973.
- Zentner, R.P., y C.A. Campbell.** 1988. First 18 years of a long-term crop rotation study in Southwestern Saskatchewan: yields, grain protein and economic performance. *Can. J. Plant Sci.* 68 (Jan): 1-21. ■

[volver al índice](#)

Revisión del marco legal sobre uso y conservación de suelos en la Argentina

Natalia Abruzky^{1,*} y Martín Torres Duggan^{2,3}

¹ Abogada, especialista en asesoría jurídica de empresas; ² Tecnoagro; ³ Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACCS)

*Contacto: nabruzky@cpacp.org

INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso natural limitado, que requiere de miles de años para su formación. Sobre él se desarrolla la vida vegetal y animal. Presenta múltiples funciones que hace posible el adecuado funcionamiento tanto de ecosistemas naturales como de los agro-ecosistemas (Guiffré, 2011). La producción agrícola, que aporta el 9% del PBI de la Argentina, es una de las actividades económicas más importante del país. La exportación de cereales y oleaginosas (e.g. trigo, maíz, soja, girasol) es una fuente significativa de ingreso de divisas. El 90% de la producción de cultivos de grano se realiza en la Región Pampeana (que abarca aproximadamente las provincias de Buenos Aires, sur de Santa Fe y Entre Ríos y sud-este de Córdoba) (Lavado y Steinbach, 2009).

Durante las últimas décadas y en especial a partir de los años 90, tuvo lugar un proceso de intensificación de la agricultura, a partir de la adopción de nuevas tecnologías (e.g. siembra directa, nuevos genotipos, uso de fertilizantes, etc.). En los últimos 50 años, debido a la aplicación de estas tecnologías, se pasó de producir 18 millones de toneladas de granos a prácticamente 100 millones de toneladas producidas en la actualidad. Este aumento se debió en mayor medida al incremento en la productividad de los cultivos (rendimiento por unidad de superficie) y en las últimas décadas también a una ampliación de la frontera agrícola hacia regiones extra-pampeanas. A pesar del progreso tecnológico y del aumento considerable del rendimiento de los cultivos, tuvo lugar un significativo deterioro del recurso suelo. Dentro de los procesos de degradación la erosión hídrica y eólica, la compactación del suelo y la pérdida de materia orgánica (MO) y nutrientes, son algunos de los más significativos por su extensión e incidencia (Lavado y Taboada, 2009).

Para tener una idea del impacto de la agricultura sobre la calidad o fertilidad del suelo, diferentes investigaciones y relevamientos efectuados en la Región Pampeana indican que los suelos han

perdido en promedio un 30-50% de la MO original y en algunas zonas con prolongada historia agrícola (e.g. sur de Santa Fe y norte de Buenos Aires) hasta el 70% (Lavado y Taboada, 2009). Asimismo, la extracción de nutrientes efectuada por los granos cosechados es escasamente reemplazada a través de la fertilización de los cultivos, siendo los balances de nutrientes (diferencia entre los nutrientes extraídos en los granos y los aportados a través del uso de fertilizantes) fuertemente negativos. Esto explica el deterioro de la fertilidad química que han sufrido los suelos, con significativas pérdidas de nutrientes, en especial nitrógeno, fósforo, azufre y más recientemente potasio (García y Salvaggiotti, 2009). Lo paradójico del contexto planteado, es que el progreso en productividad causado por la adopción tecnológica ha enmascarado considerablemente los procesos de deterioro y pérdida de la fertilidad química del suelo (Urricarriet y Lavado, 1999).

Como aspecto favorable, el avance científico también fue notable en las últimas décadas, con gran intensificación de las actividades de investigación y extensión ejercida por diferentes organizaciones como el INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria), AACREA (Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola), AAPRESID (Asociación Argentina de Productores en Siembra directa), Universidades, etc. Asimismo, la AACCS (Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo), fundada hace más de 50 años, tuvo un rol protagónico en difundir los resultados de investigaciones realizadas por grupos de investigación local a través de sus "Congresos Argentinos de la Ciencia del Suelo" realizados cada dos años y su órgano de difusión de resultados de investigaciones: la revista "Ciencia del Suelo". Más recientemente se suman organizaciones como el IPNI (International Plant Nutrition Institute) y Fertilizar Asociación Civil, muy importantes en términos de organización de eventos técnicos de divulgación y extensión en temas vinculados con los suelos y la fertilización de cultivos. Toda esta actividad de investigación

y extensión permitió generar un cuerpo de información científica básica y aplicada en diferentes disciplinas de las Ciencias Agropecuarias y se podría decir que actualmente se dispone de abundante información científica y técnica sobre cómo se deberían manejar los suelos y cultivos bajo esquemas sustentables. Como se discutirá más adelante en este documento, el grado de aplicación de estos principios en el marco legal vigente en materia de uso y conservación del suelo es muy bajo.

La agricultura argentina se ha transformado notablemente en las últimas décadas, no solo en términos del incremento en la productividad, sino también en la configuración de las formas organizacionales e institucionales utilizadas en la agricultura moderna. El área jurídica e incluso la ciencia económica, no han tomado conciencia de ello (Alvarado Ledesma, 2008). El marco jurídico imperante se basa en la ley 13.246 del año 1948, que si bien tuvo una reforma en 1980, de acuerdo al autor, la realidad responde a un país totalmente diferente del actual. Las alternativas contractuales utilizan contratos accidentales, regulado por el Código Civil, que permite un máximo de dos años, con lo cual se promueve un esquema de tenencia de la tierra de corto plazo (Alvarado Ledesma, 2008). Esto se puede verificar empíricamente observando los actuales sistemas de explotación agrícola de la Argentina, donde los esquemas de arrendamiento a corto plazo (uno o dos años) son los más extendidos. Estos esquemas de tenencia de la tierra de corto plazo alcanzan el 50-70% del área sembrada y promueven la siembra del cultivo de soja (monocultivo), que se considera el de menor riesgo productivo (García y Salvaggiotti, 2009). Las implicancias del monocultivo de soja, como en cualquier monocultivo, son poco favorables para el suelo y la sustentabilidad de los agrosistemas. Un rasgo preocupante de este modelo agrícola es que la soja aporta muy pocos residuos ("rastreo") al suelo y es menos fertilizada que otros cultivos como trigo o maíz, con lo cual los suelos van perdiendo progresivamente su dotación de nutrientes a través del tiempo.

Las externalidades y el impacto ambiental de la producción agrícola no son considerados en los análisis económicos convencionales, basados en los márgenes brutos de los cultivos (Alvarado Ledesma, 2008). Estos presupuestos parciales solo consideran los costos o egresos directos (e.g. semilla, labores, etc.) y el ingreso directo esperado por la venta del grano. Es decir, el cos-

to implícito de la pérdida de fertilidad del suelo generada en cada cosecha, no es contemplado ni en los contratos, ni en la administración de los establecimientos agropecuarios.

El contexto planteado genera preocupación en el ámbito académico, donde existe acuerdo en relación a que los actuales modelos de producción agrícola no son sustentables y tienen un muy bajo grado de aplicación y adopción del conocimiento científico disponible (Rubio, 2011; Lorenzatti, 2011). El manejo sustentable de los agrosistemas implica la consideración simultánea de los aspectos económicos, sociales y ambientales. Sin embargo, el modelo de producción agrícola dominante actualmente, prioriza la rentabilidad y resultados económicos, dejando de lado los aspectos sociales y/o ambientales (Martínez, 2011).

Existen pocos antecedentes que aborden críticamente la normativa legal vigente en materia de conservación y uso del suelo en la Argentina y su grado de adecuación a las prácticas agrícolas actuales. El objetivo principal del presente trabajo es revisar el marco legal vigente en materia de conservación de suelos, y analizar posibles acciones tendientes a mejorar la actualización y aplicación práctica del mismo en un contexto de buenas prácticas agrícolas y manejo sustentable del recurso suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

En primer lugar se analizó el estado actual de degradación de los suelos a través de fuentes bibliográficas recientes y se revisó el plexo normativo actual en materia de manejo y conservación de suelos. Para ello se revisó la legislación nacional, provincial y en algunos casos, relevamientos a escala municipal. A partir de dicha información se realizó un diagnóstico utilizando principios del razonamiento deductivo y la teoría de argumentación jurídica (Alexy, 1989) donde las conclusiones derivan de proposiciones (premisas) a través de un razonamiento lógico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Normativa Nacional y provincial. Casos especiales. Municipios.

La primer legislación a nivel nacional que hizo mención sobre el recurso natural suelo fue la ley de Arrendamientos y Aparcerías rurales en el año 1921. El fin de dicha norma era reglar aquellos

vínculos que existían a lo largo de nuestro país nacidos de contratos poco claros elaborados por grandes estancieros o latifundistas, donde los abusos de la parte más débil eran habituales. En aquellos años, solo se normaba las condiciones del contrato de arrendamiento sin siquiera imaginar el término conservación, que tardaría varios años en comenzar a utilizarse en nuestro país. Recién en el año 1948 a través de la ley 13.246 se comienza a legislar sobre la explotación irracional del suelo, estableciendo en su artículo octavo que “queda prohibida toda explotación irracional del suelo que origine su erosión o agotamiento, no obstante cualquier cláusula en contrario que contenga los contratos respectivos. En caso de violarse esta prohibición por parte del arrendatario, el arrendador podrá rescindir el contrato o solicitar judicialmente el cese de la actividad prohibida, pudiendo reclamar en ambos casos los daños y perjuicios ocasionados...”. Si bien dicho artículo implicó un gran progreso ya que fue la primera incorporación de aspectos vinculados con la conservación del suelo, no ha sido lo suficientemente clara ya que no especificaba cuáles eran aquellos hechos o prácticas irracionales que podrían llegar a producir la erosión, degradación o agotamiento del suelo, faltando una enumeración detallada de las mismas. Tampoco detallaba las prácticas de conservación recomendadas para el estado del arte y la ciencia agronómica de aquel entonces. Asimismo, se omitía la aplicación de la obligación de conservación del suelo a los casos donde la explotación agropecuaria se realizaba en campos donde no existía un contrato, pues eran fundos de propiedad. Se estipula como autoridad de aplicación el Ministerio de Agricultura de la Nación Argentina.

Es importante destacar que, posteriormente, la ley 17.711 (1969) limitó el concepto de derecho absoluto conferido al artículo 2513 del Código Civil, estableciendo con su nueva redacción que es “... inherente al derecho de propiedad el derecho de poseer la cosa de disponer o de servirse de ella, usarla y gozarla conforme a un ejercicio regular...” donde el interés público avanza sobre el interés privado en el ejercicio del derecho de dominio y del uso de los suelos.

En 1980, la ley 22.298 introdujo modificaciones a la ley 13.246. Si bien se mantiene la prohibición de degradar el recurso suelo determina, en caso de violación por parte del arrendatario, que el arrendador podrá rescindir el contrato o recurrir a la vía judicial para solicitar el cese de dicha

actividad, teniendo la opción de reclamar los daños y perjuicios ocasionados por dicha falta. Sin embargo, nuevamente, no ofrece un ulterior detalle de cuáles serían prácticas agronómicas inadecuadas y/o adecuadas para el manejo del suelo.

En el año 1981 se sanciona la ley nacional 22.428 sobre recuperación y conservación de suelos. Los objetivos de la ley eran “... crear conciencia entre los productores acerca de la gravedad del problema de la degradación de los suelos y el reconocimiento de su rol protagónico en la conservación y mejoramiento, alentándose su participación en consorcios voluntarios y conservacionistas y la adopción por el Estado de medidas de fomento, financieras y crediticias y técnicas para estimularlos...” (Brebba, 1992). Dicha ley fue reglamentada por el decreto 681/81 y estipulaba estándares mínimos para planes de conservación e implementación de la ley. La ley ofrecía beneficios para los productores que formaban parte de los consorcios, recibiendo subsidios para la conservación del suelos de entre el 30% y el 70% de los costos de las inversiones y gastos que implicasen dichos planes de conservación y se estipulan otros planes sobre exenciones impositivas. Asimismo, se establecían esquemas de reintegros y las responsabilidades penales pertinentes para los casos de incumplimiento.

En el año 1994, con la reforma de la carta magna, se incluyen artículos relacionados con la propiedad, la jurisdicción y los derechos ambientales para las generaciones actuales y futuras sobre los recursos naturales, aplicables al recurso suelo. El artículo 124 de la Constitución Nacional consagra el dominio de las provincias por sobre los recursos naturales. Se destaca el hecho que la jurisdicción para ejecutarlos y legislarlos la mantiene la nación, o sea que es de carácter federal. En términos generales, aunque el dominio sea provincial, la jurisdicción será federal en cuanto afecte al comercio o a la navegación interprovincial o internacional (Frías, 1980).

El nuevo artículo 41 establece que “... todos los habitantes gozan del derecho a un ambiente sano, equilibrado, apto para el desarrollo humano y para que las actividades productivas satisfagan las necesidades presentes sin comprometer la de las generaciones futuras; y tienen el deber de preservarlo. El daño ambiental generará prioritariamente la obligación de recomponer, según lo establezca la ley, “...Las autoridades proveerán la protección

de este derecho, a la utilización racional de los recursos naturales, a la preservación del patrimonio natural y cultural y de la diversidad biológica, y a la información y educación ambientales...”

Con el fin de establecer un “mínimo piso legislativo” en materia de protección de los recursos naturales el legislador estableció: “Corresponde a la Nación dictar las normas que contengan los presupuestos mínimos de protección, y a las provincias, las necesarias para complementarlas, sin que aquellas alteren las jurisdicciones locales”. Dicho estatus jurídico de “mínimo piso legislativo” implicó sumar vaguedad y ambigüedad al contexto reinante. Sin embargo, finalmente en el año 2002, a través de la ley 25.675, se dispuso en su artículo 6: “...Se entiende por presupuesto mínimo, establecido en el artículo 41 de la Constitución Nacional, a toda norma que concede una tutela ambiental uniforme o común para todo el territorio nacional, y tiene por objeto imponer condiciones necesarias para asegurar la protección ambiental. En su contenido, debe prever las condiciones necesarias para asegurar la dinámica de los sistemas ecológicos, mantener su capacidad

de carga y en general, asegurar la preservación ambiental y el desarrollo sustentable...”. La ley crea un sistema federal ambiental para coordinar las políticas ambientales (Acuña, 2009).

La Argentina ha ratificado el tratado internacional, ley 24.701 sobre la convención de las Naciones Unidas de lucha contra la desertificación y la sequía, donde los estados se comprometen a prestar especial atención a la aplicación de medidas preventivas para las tierras aun no degradadas o solo levemente degradadas.

Es importante aclarar que algunas de las normas descritas previamente, o bien se encuentran vigentes, o bien sufrieron modificatorias como en el caso de la ley de arrendamientos, mientras que otras, como la ley de Conservación de suelos, se encuentran sin financiamiento. También es posible observar la convivencia de leyes anteriores y posteriores a la reforma constitucional de la carta magna realizada en 1994.

En las **Tablas 1 a 5**, se presenta un sumario del plexo normativo vigente en materia de conservación de suelos para diferentes provincias de la Argentina.

Tabla 1. Sistema normativo vigente en materia de conservación de suelos en la provincia de Buenos Aires. Fuente: Adaptado de Acuña, 2009; Giuffré y Formento, 2011.

Plexo Normativo Provincial	Contenido	Observaciones
<p>Normas previas a 1995:</p> <p>-Decreto Ley de Ordenamiento Territorial y Uso de Suelos N 8912</p> <p>-Código Rural de la Provincia de Buenos Aires Año 1995</p> <p>-Ley 11.723 “Protección, conservación, mejoramiento y restauración de los recursos naturales y del ambiente en general”</p>	<p>Normas previas a 1995:</p> <p>-Decreto Ley de ordenamiento territorial y uso de suelos 8912</p> <p>Nota: hace hincapié en el ordenamiento territorial, solo incidentalmente menciona la preservación de la tierra para su destino y la calidad del medio ambiente. Da a los municipios la competencia sobre el uso de suelos.</p> <p>El Código establece obligaciones para el sector público y para el privado.</p> <p>Estado debe controlar la erosión de los suelos y establecer normas obligatorias para el mejoramiento de la fertilidad.</p> <p>Los privados deberán: denunciar erosión de suelos, ejecutar planes oficiales con sanciones penales ante el incumplimiento. No se contemplan beneficios fiscales.</p> <p>Importante: actualmente no se cumple lo que el código establece en materia de conservación y recuperación de suelos.</p> <p>Año 1995:</p> <p>Ley 11.723 Art 45 al 49 “Del suelo”, establecen los principios para la implementación de políticas de protección y mejoramiento del recurso suelo: “...sistemas de control de degradación de suelos... tratamiento impositivo diferenciado... participación de juntas multidisciplinarias para el mejor manejo del recurso suelo...”</p>	<p>Acciones municipales para conservación suelos basadas en el decreto ley 8912, casos exitosos:</p> <p>-Caso Municipalidad de Daireaux: Política pública municipal y articulación tecnológica con centros académicos. Programa de Mejoramiento de Suelos de Daireaux” (Municipalidad de Daireaux-FAUBA). Premio provincial 2007 a la Innovación de la Gestión Pública.</p> <p>-Caso Lincoln: realizó un anteproyecto de ley provincial de suelos con base en la racionalidad del uso de la tierra y contempla su interés social y económico.</p>

Tabla 2. Sistema normativo vigente en materia de conservación de suelos en la provincia de Entre Ríos.

Fuente: Adaptado de Acuña, 2009; Giuffré y Formento, 2011.

Plexo Normativo Provincial	Contenido	Observaciones
Ley 8318 año 1989	<p>Ley 8318 declara de interés público y sujeto al uso y manejo conservacionista a los suelos de la provincia que manifiesten síntomas de degradación. Incluye a los suelos que se degradan por acciones antrópicas y los que lo hacen por condiciones naturales.</p> <p>Estipula estímulos fiscales, exenciones impositivas y el otorgamiento de créditos especiales. Se prevén desgravaciones para los interesados que presenten el plan de manejo y conservación de suelos avalados por un ingeniero agrónomo.</p>	<p>Incluye el concepto de "drenaje adecuado" lo que lo integra el manejo de los suelos con el manejo de los recursos hídricos.</p> <p>Se dictaron resoluciones ministeriales la N° 26 en el año 1994 y la N° 20 en el 2005.</p> <p>La primera establece la siembra directa como práctica probada. La N 20 establece la implantación de praderas como herramienta de conservación de suelos y otorga beneficios impositivos.</p> <p>Se encuentran testimonios de realización aunque hay polémicas por aumentos de los impuestos</p>

Tabla 3. Sistema normativo vigente en materia de conservación de suelos en la provincia de Santa Fe.

Fuente: Adaptado de Acuña, 2009; Giuffré y Formento, 2011.

Plexo Normativo Provincial	Contenido	Observaciones
<p>Constitución provincial art 28</p> <p>-Código rural año 1901 aun no reformado.</p> <p>-Ley 12.825 año 2007 "Programa provincial de difusión del conocimiento y conservación de los suelos de la provincia de Santa Fe"</p> <p>-Ley 11717 año 1999 de Medio Ambiente y desarrollo sustentable.</p>	<p>-Constitución provincial art 28:"...la provincia promueve la racional explotación de la tierra...protege el suelo de la degradación y erosión, conserva y restaura la capacidad productiva de la tierras y estimula el perfeccionamiento de las bases técnicas del laboreo..."</p> <p>Ley 12.895: destaca la importancia de la educación del recurso no renovable suelo, promocionando y fomentando el buen uso y la conservación para las generaciones futuras"</p> <p>Ley 11717, establece principios para preservar, conservar y mejorar el medio ambiente y los recursos naturales. Otorga al estado el rol de fiscalizar el uso del suelo y del subsuelo y la capacidad de investigar de oficio las acciones susceptibles de degradar el suelo.</p>	<p>Muy general y de baja aplicación en la práctica por faltar acciones de control.</p> <p>Interesante en cuanto a que tiene implícito el desarrollo sustentable como marco en el manejo de los recursos.</p>

Tabla 4. Sistema normativo vigente en materia de conservación de suelos en la provincia de La Pampa.
Fuente: Adaptado de Acuña, 2009; Giuffré y Formento, 2011.

Plexo Normativo Provincial	Contenido	Observaciones
Constitución Provincial de 1960 y reformada 1994. Ley ambiental Provincial 1914 del año 2001 Ley de suelos 2139	Constitución provincial art 18: "... Protege el ambiente y los recursos naturales, promoviendo du utilización racional.a) la protección del suelo..." Art 33" la propiedad debe cumplir una función social..." Ley 1914 incorpora la Evaluación de Impacto Ambiental. Ley de suelos 2139 "...declara de interés público el uso sustentable del recurso suelo y las acciones privadas y/o públicas destinadas al manejo de su recuperación, preservación y conservación. ...y a la promoción de la educación para su uso racional". Estipula créditos a tasas preferenciales, sistema de sanciones ante incumplimientos.	La ley de suelos 2139 dispone de un plazo para realizar un inventario de los recursos naturales de la provincia. Crea un Consejo asesor de suelos con miembros públicos, privados, académicos y técnicos. Clasifica aéreas como: obligatorias, voluntarias y experimentales; y para cada caso planes de manejo, conservación y recuperación de suelos. La falta de estímulos fiscales y las sanciones existentes hacen que sea muy cuestionado y poco eficiente.

Tabla 5. Sistema normativo vigente en materia de conservación de suelos en la provincia de Córdoba.
Fuente: Adaptado de Acuña, 2009; Giuffré y Formento, 2011.

Plexo Normativo Provincial	Contenido	Observaciones
Constitución Provincial año 1987, reformada en 2001. Ley 8863 del año 2000 "Régimen de Creación y Funcionamiento de Consorcios de Conservación de Suelos". Ley 8936 del año 2001 "Régimen de conservación y prevenciones de degradación de suelos"	Constitución provincial art 11 otorga al Estado provincial la obligación de preservar los recursos naturales ordenando su uso y explotación y resguardando el equilibrio ecológico. Ley 8863, le otorga a los consorcios el carácter de persona jurídica y le da la función a los consorcios de proponer planes y proyectos, construcción de obras y el control del mantenimiento de los planes de conservación de suelos. SE establecen beneficios para los consorcistas, subsidios, asistencia técnica. Ley 8936 dispone de orden público la conservación y el control de la capacidad productiva de los suelos, la prevención de los mismos, la recuperación y educación ambiental. Se estipula un régimen de sanciones en caso de incumplimiento. El Estado provincial asume la obligación de elaborar un diagnóstico general del estado de los suelos, establecer un catálogo de prácticas conservacionistas y establecer los mecanismos que permitan a los consorcistas acceder a aportes y/ o financiamientos nacionales e internacionales. Finalmente, coordina el funcionamiento del Consejo Central de Protección de Suelos.	Ley 8863, si bien manifiesta la necesidad de parte de los consorcios de recibir mayor estímulos, aún sigue siendo un buen estímulo para los productores y municipios.

DIAGNÓSTICO Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con la información presentada previamente, es posible establecer algunas premisas donde existe suficiente acuerdo académico como para realizar un diagnóstico de la problemática de la conservación del suelo en el ámbito de la producción agrícola actual:

- i. Existe una clara evidencia de ocurrencia de procesos de deterioro del recurso edáfico (e.g. Lavado y Taboada, 2009; Martínez, 2011).
- ii. Se dispone de información científica de gran nivel académico en relación a cuáles son las prácticas agronómicas adecuadas para ser utilizadas en el marco de sistemas sustentables (e.g. Lorenzatti, 2011; García, 2012;)
- iii. Se dispone de un plexo normativo significativo en materia de conservación de suelos, cuyo grado de aplicación es bajo (e.g. Alvarado Ledesma, 2008; Acuña, 2009; Giuffré y Formento, 2011).
- iv. El marco normativo vigente presenta un bajo grado de ajuste a la realidad productiva actual, sobre todo en términos tecnológicos, organizacionales y económicos de los modelos de producción agrícola (Alvarado Ledesma, 2008; Lorenzatti, 2011).

En base a las proposiciones planteadas, no es posible atribuir el deterioro del recurso suelo a la ausencia de un marco legal o a la falta de información técnica y científica sobre prácticas agrícolas. Por el contrario, una hipótesis alternativa sobre el bajo grado de aplicación de prácticas de conservación en las explotaciones agropecuarias se vincularía con la falta de políticas e instrumentos, que han estado ausentes durante décadas. El marco institucional y económico vigente, presenta una serie de rasgos o características que no propenden hacia la aplicación y/o consideración de modelos de producción agrícolas sustentables:

- i. Aplicación de derechos de exportación (“retenciones”), que promueven la siembra de cultivos más rentables y con menor riesgo (e.g. soja), en detrimento de otros como el trigo o maíz, que mejoran la calidad del suelo y la sustentabilidad de los agrosistemas. Estos últimos cereales han reducido considerablemente su área sembrada, resultando en una relación oleaginosa/cereales no sustentable.
- ii. Incremento de la escala de producción y nuevas formas organizativas como los pooles de siembra. Nuevas formas de administración como el fideicomiso.

- iii. Preponderancia de los arrendamientos y aparcerías de corto plazo (máximo dos años) como sistema de tenencia de la tierra imperante. Estos contratos, en general, no incluyen cláusulas o principios de manejo acordados por el propietario y arrendatario que permitirían un manejo más racional del recurso edáfico (e.g. rotaciones con gramíneas, fertilización balanceada, control del tráfico de maquinaria, etc.).
- iv. Ausencia de políticas de apoyo al sector agropecuario, en general, y en materia de conservación de los suelos, en especial.
- v. Baja articulación y/o interacción entre el sector científico y tecnológico (e.g. CONICET, INTA, Universidades) con los responsables de aplicar y tomar decisiones políticas en materia de producción agropecuaria, en general, y conservación del suelo, en particular.

Como se desprende del panorama planteado, que no pretende ser exhaustivo, el marco legal es un aspecto parcial de una problemática compleja donde intervienen aspectos tecnológicos, institucionales, y económicos, entre otros. Sin embargo, es posible definir una serie de acciones que, de ser implementadas a través de políticas públicas, mejorarían la sustentabilidad de los agro-ecosistemas en términos de la conservación y manejo del recurso suelo. Una de ellas es la necesidad de actualización y ajuste de las normas vigentes, especificando de un modo más explícito cuáles son las prácticas sustentables para manejar el recurso edáfico en base a la información y principios de buenas prácticas agrícolas disponibles en las diferentes eco-regiones del país (información basada en principios científicos y tecnológicos). También se debe dejar claro cuáles prácticas de manejo no son recomendables y analizar alternativas de penalización/control en casos de incumplimientos.

En cuanto a los contratos privados que se están utilizando actualmente en las explotaciones agropecuarias (e.g. arrendamientos y aparcerías rurales) es necesario permitir y promover esquemas de tenencia de la tierra de mayor largo plazo (más de dos años) e incorporar en los mismos cláusulas específicas sobre tipo de cultivo y rotaciones a realizar, dosis de fertilizante a aplicar, etc.

En los últimos tiempos se han generado una serie de proyectos de leyes nacionales sobre promoción del uso de fertilizantes, cuyo tratamiento escapa el alcance del presente escrito. Un sumario de los mismos para el período 2008-2010 se puede consultar en Campos et al. (2012). Más

recientemente, se está discutiendo un proyecto de ley sobre conservación y mejoramiento de la fertilidad de los suelos de uso agropecuario a través de la promoción del uso de fertilizantes para la actividad agropecuaria y las adecuadas prácticas de aplicación. Este proyecto de ley liderado por el diputado Luis E. Basterra tendrá tratamiento legislativo durante el año 2015 y se destaca por haber sido elaborado a partir de una amplia base de debate con una activa participación de entidades como Fertilizar Asociación Civil, CIAFA, AACREA, y Fundación Vida Silvestre, entre otras (Basterra, 2014). Se mencionan a continuación algunos de los aspectos destacados de este proyecto de ley:

- › Contempla la deducción como gasto adicional en la liquidación anual del impuesto a las ganancias del 100% del monto deducible por gastos en fertilizantes para uso agropecuario a partir del ejercicio fiscal en el que se comercialice la primera producción a la que fueron aplicados los mismos
- › A los efectos de acceder al beneficio de la promoción, los titulares de las explotaciones agropecuarias deben presentar ante la AFIP un plan de siembra con una duración de 3 a 5 años, donde se debe indicar el tipo de cultivo, antecesor, superficie a sembrar, y las rotaciones previstas; un plan de fertilización anual, que incluye el tipo de dosis de fertilizantes a aplicar en base a buenas prácticas agronómicas. El Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca establecerá los máximos volúmenes de fertilizante a aplicar en las diferentes regiones según las características del cultivo, condiciones del suelo, etc.; estudios de fertilidad del suelo (con muestras georreferenciadas) para el monitoreo de la fertilidad edáfica y un informe con la justificación de las modificaciones realizadas en el último plan de siembra (cuando correspondiere); como así también una declaración jurada de fiel cumplimiento de los planes presentados bajo los requisitos que establezca la reglamentación
- › Se prevén regímenes para titulares de explotaciones agropecuarias inscriptos como monotributistas y también a agricultores inscriptos en el Registro Nacional de Agricultura Familiar donde es posible solicitar al órgano provincial competente la provisión de fertilizantes como fondos no reembolsables.

Por lo mencionado antes, resultaría muy importante lograr que todo el conocimiento generado en el sistema científico y tecnológico, no solo se

traduzca en publicaciones y/o actividades académicas, sino que sean utilizadas como referencia y lineamientos en la generación de políticas públicas en materia agropecuaria y en especial en aspectos referidos a la conservación y manejo del recurso edáfico. Un marco institucional de este tipo sería apropiado para luego avanzar en procesos de mejora en el marco jurídico, propendiendo tanto a su actualización al estado del arte y la ciencia agrícola moderna, como a su aplicación a nivel de las explotaciones agropecuarias.

CONCLUSIONES

- › No resulta razonable atribuir el deterioro del recurso suelo a la ausencia de un marco legal o a la falta de información científica o técnica disponible en el ámbito local sobre el adecuado manejo y conservación de suelos (i.e. buenas prácticas agrícolas).
- › El bajo grado de aplicación de prácticas de conservación de suelos en los sistemas agropecuarios se vincularía con la ausencia de políticas e instrumentos adecuados, que han estado ausentes por décadas y sobre las cuales se debe trabajar para lograr estímulos (e.g. desgravación de impuestos) a la implementación de prácticas agrícolas sustentables.
- › El marco institucional y económico vigente no propicia el desarrollo de modelos de producción sustentables.
- › Algunas acciones que permitirían mejorar el contexto normativo podría ser la especificación en los contratos de arrendamiento del tipo prácticas agronómicas a implementar según la información disponible en cada región sobre las buenas prácticas agrícolas (e.g. rotaciones, dosis de fertilizantes, etc.); y definir plazos más prolongados para la celebración de los contratos.
- › Los proyectos de leyes que permitan la desgravación directa del uso de fertilizantes resultan promisorios, puesto que aumentan la rentabilidad del cultivo (por la reducción en los gastos en fertilizantes), y al mismo tiempo mejoran la fertilidad del suelo (a través de balances de nutrientes más favorables). Para que este tipo de proyectos resulten exitosos, los mismos deben formar parte de una política agropecuaria integral.

BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, J.C.** 2009. La conservación de suelos en la legislación provincial, nacional e internacional, Jornada de Conservación del Suelo. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACs). 19 de noviembre.
- Alexy, R.** 1989. Teoría de la argumentación jurídica. Traducción de M. Atienza e I. Espejo. Centro de Estudios Constitucionales. Madrid.
- Alvarado Ledesma, M.** 2008. ¿Por qué despreciamos el agro? Historia de un conflicto. Editorial El Ateneo. 255 p.
- Basterra, L.** 2014. Ley de promoción de uso de los fertilizantes. Disertación en el marco del festejo de los 20 años de Fertilizar. 2 de diciembre. Buenos Aires, Argentina.
- Brebbia, F.** 1992. Manual de Derecho Agrario. Editorial Astrea. P. 416.
- Campos, M., S. Campos Carlés, P. Garré, V. González Besteiro, F. Mayer, J. Micheloud, L.B. Pederiva, y N. Udaquiola.** 2012. Mercado de fertilizantes. La Argentina y el mundo. AACREA. Anexo D. p 87
- Frías, P.** 1980. Introducción al Derecho Público Provincial. Editorial Depalma
- Giuffré, L.** 2011. Introducción a la Edafología. En: Edafología, bases y aplicaciones ambientales argentinas. Capítulo 1. M. E. Conti, L. Giuffré (Editoras). Editorial Facultad de Agronomía, UBA, p.628 Capítulo
- Giuffré, L., y S. Formento.** 2011. Marco regulatorio de la sustentabilidad del recurso natural suelo. En: Edafología, bases y aplicaciones ambientales argentinas. M. E. Conti, L. Giuffré (Editoras). Editorial Facultad de Agronomía, UBA, p.628.
- Giuffre, L., S. Formento, y S. Ratto,** 2006. Transversalidad de conceptos de educación ambiental para un desarrollo sostenible en la legislación argentina, Congreso Argentino de Ciencias del Suelo, Salta.
- García, F.O.** 2012. The 4R in a Latin American context. Right source at right rate, right time and right place. Fertilizer Latino Americano Conference and Exhibition. Buenos Aires. January 2013. FMB.CRU Events.
- García, F.O., y F. Salvagiotti.** 2009. Eficiencia de uso de nutrientes en Sistemas agrícolas del Cono Sur de Latinoamérica. En: Actas del XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica. 16 al 20 de noviembre de 2009. Simposio "Eficiencia de la Utilización de Nutrientes en Sistemas Agrícolas". 18p.
- Formento, S.** 2001. Legislación Agroambiental, en: Agrosistemas: Impacto Ambiental y Sustentabilidad, Lidia Giuffre Editora, Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, p.493.
- Haberle, P.** 2009. Un derecho constitucional para las futuras generaciones. La otra forma del contrato social: el contrato generacional, traducción: Milton Fellay y Leandro Ferreyra, Lecciones y Ensayos, nro. 87. Revista Facultad de Derecho y Ciencias Sociales de la Universidad de Buenos Aires.
- Lavado R.S., y H.S. Steinbach.** 2010. Principales rasgos de la agricultura pampeana, En: Fertilidad de Suelos, Caracterización y manejo en la región pampeana (Álvarez, R., Rubio, G., Álvarez, C., Lavado, R.S. eds). Sección 1, Capítulo 2, Editorial Facultad de Agronomía (UBA)., 423pp.
- Lavado, R.S., y M.A. Taboada.** 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, Sept/ Oct - Vol.64, NO.5.
- Lorenzatti, S.** 2011. Los sistemas de producción actuales y futuros de la Región Pampeana. Una visión empresaria. En: Simposio "Fertilidad 2011". García, F., Correndo, A. (Editores). IPNI Cono Sur-Fertilizar Asociación Civil. 275 p
- Martínez, F.** 2011. El suelo y los modelos productivos, una aproximación a la problemática agrícola de la Región Pampeana norte. En: Simposio "Fertilidad 2011". García, F., Correndo, A. (Editores). IPNI Cono Sur-Fertilizar Asociación Civil. 275 p.
- Rubio, G.** 2011. Los sistemas de producción actuales y futuros de la Región Pampeana. Una visión desde el sector científico. En: Simposio "Fertilidad 2011". García, F., Correndo, A. (Editores). IPNI Cono Sur-Fertilizar Asociación Civil. 275 p
- Urricarriet, S., y R.S. Lavado.** 1999. Indicadores de deterioro en suelos de la pampa ondulada, Ciencia del Suelo, 1999, 17:37-44.

[volver al índice](#)

Respuesta del maíz a la fertilización nitrogenada por zonas de manejo[†]

Susana M. Albarenque¹, Bruno Basso², Octavio Caviglia^{1,3,4} y Ricardo J.M. Melchiori¹

¹Inta EEA Paraná, ²Michigan State University, ³CONICET, ⁴FCA-UNER

*Contacto: albarenque.susana@inta.gob.ar

[†]Trabajo publicado en el XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 5 al 9 de Mayo de 2014. Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.

INTRODUCCIÓN

La agricultura de precisión enfrenta el desafío de cuantificar la variabilidad de los procesos y las propiedades del suelo, determinando donde y cuando estas son responsables de las variaciones en el rendimiento de los cultivos (Mulla y Schepers, 1997) para poder aplicar tecnologías y principios que permitan manejar la variabilidad espacio-temporal de los cultivos (Pierce y Nowak, 1999).

Los suelos de la provincia de Entre Ríos presentan un ambiente de variabilidad potencialmente alta por sus características reflejándose tanto en la heterogeneidad de los tipos de suelo a diversas escalas, así como en los efectos de interacción entre las características intrínsecas de los suelos, la topografía y la dinámica del agua en los ambientes ondulados. Existen antecedentes que han permitido identificar al grado de erosión y la baja fertilidad físico-química como las características que más claramente permiten diferenciar zonas por su productividad potencial (Melchiori, 2007). Las zonas de diferente productividad o de manejo, representan subregiones dentro de los lotes que expresan una combinación relativamente homogénea de factores determinantes del rendimiento para los que resulta apropiada una proporción única de insumos (Doerge, 1999). Cada zona debe mostrar diferente respuesta del cultivo a los fertilizantes y a otros insumos, y estas respuestas necesitan ser confiablemente estimadas antes de tomar decisiones de manejo (Miao et al., 2006).

La evaluación de las posibles interacciones entre suelo, clima, y manejo del N implican la realización de numerosos experimentos de campo repetidos en el tiempo. Los modelos de simulación pueden ayudar a tomar decisiones sobre estrategias de aplicación de N teniendo en cuenta este tipo de interacciones (Rinaldi, 2004), acelerando el desarrollo de recomendaciones según zonas de manejo.

Existen diversos modelos de simulación que han sido evaluados y utilizados satisfactoriamente en diferentes lugares del mundo, entre ellos

los más difundidos han sido los que integran el entorno DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) (e.g. CERES, Ritchie and Otter, 1985; Jones and Kiniry, 1986) y fueron creados para simular el crecimiento, desarrollo y rendimiento de distintos cultivos, incluyendo rutinas para estimar la dinámica del agua y del nitrógeno (Jones et al., 2003). El modelo SALUS (System Approach to Land Use Sustainability) fue desarrollado a partir de CERES e incluye nuevos enfoques y algoritmos (Basso et al., 2012). SALUS-Terrae es un modelo de simulación que ha sido diseñado para predecir la variabilidad espacial y temporal del balance hídrico, permitiendo el manejo apropiado el agua y al mismo tiempo identificar áreas susceptibles a la erosión hídrica (Basso, 2005). Contar con el modelo SALUS calibrado y validado localmente sería de suma utilidad al momento de emplear SALUS-Terrae para aplicaciones en agricultura de precisión y conservación de suelos.

Los objetivos del presente trabajo fueron: i) calibrar y validar el modelo de simulación de cultivos SALUS, y ii) simular la respuesta a largo plazo a la fertilización nitrogenada del cultivo de maíz por zonas de manejo

MATERIALES Y MÉTODOS

La calibración del modelo SALUS se llevó a cabo utilizando datos de un ensayo realizado en el campo experimental del INTA Parana (31° 50' S; 60° 31' W, 110 m.s.n.m) durante la campaña 2011. En el mismo, se delimitaron zonas de manejo utilizando el software MZA (Management Zone Analyst) en base a mapas de conductividad eléctrica, elevación y materia orgánica. Como resultado del análisis se obtuvieron 4 zonas de manejo (**Figura 1**). Se evaluaron tratamientos de disponibilidad de N (Nd, i.e. N disponible), dentro de cada una de las ZM, que incluyeron 4 niveles de Nd: 70 kg N ha⁻¹ (Ni(0-60cm)+Nf), 140 kg N ha⁻¹ (Ni(0-60cm)+Nf), 210 kg N ha⁻¹ (Ni(0-60cm)+Nf) y un testigo (T) al que no se le aplicó N (Nd=Ni). Donde Ni(0-60cm) es el contenido de N en el suelo

(0-60cm), en forma de nitrato previo a la siembra y Nf el N agregado con el fertilizante.

La validación se realizó con datos de rendimiento de 4 años de ensayos de fertilización nitrogenada conducidos en la EEA Paraná del INTA, tres de ellos (2009, 2011 y 2012) con tres niveles de N (0, 69, 138, y 138 +138 kg N ha⁻¹ en V6); el otro ensayo (2006) incluyó cuatro niveles de N a la siembra (0, 50, 150 y 200 kg N ha⁻¹).

La simulación de la respuesta del cultivo de maíz a la fertilización nitrogenada por zonas de manejo a largo plazo se realizó con un esquema experimental similar al utilizado en la calibración, con cuatro niveles de Nd a la siembra: 0, 70, 140 y 210 kg ha⁻¹.

Se utilizaron datos diarios de temperatura (máxima y mínima), precipitación, y radiación global para un período de 41 años (1971-2012), empleando datos meteorológicos de la Estación Experimental del INTA Paraná. Los datos de suelo para caracterizar cada zona de manejo fueron obtenidos de la carta de suelos de la Experimental Paraná (Van Barneveld, 1972), las principales diferencias entre zonas de manejo en los archivos de suelo del modelo se debieron al grado de erosión, susceptibilidad a la erosión y a la capacidad de almacenar agua en el perfil.

Se evaluaron las estimaciones del modelo mediante una regresión lineal, se calculó la raíz del cuadrado medio del error (RMSE) entre el rendimiento observado y simulado, como la raíz cuadrada de la sumatoria de las diferencias al

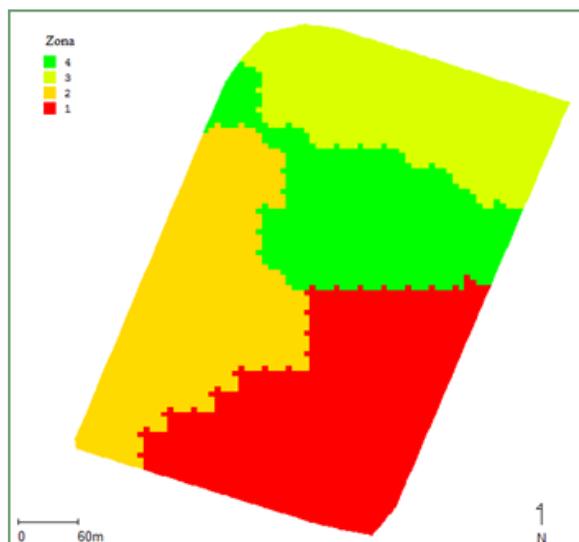


Figura 1. Zonas de manejo delimitadas a partir de mapas de conductividad eléctrica, elevación y materia orgánica.

cuadrado sobre el número de observaciones; y el porcentaje de error (EE%) como el cociente entre el RMSE y el rendimiento observado promedio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Validación del modelo

El modelo simuló adecuadamente el rendimiento del cultivo de maíz (RMSE=1169 kg ha⁻¹; EE=14%, r²=0.82) (Figura 2), arrojando resultados similares en la performance del modelo a los obtenidos por Basso et al. (2011) al validarlo para simular la respuesta a N del cultivo de trigo.

El modelo mostró sensibilidad a los cambios en las zonas de manejo, así como a las diferentes disponibilidades de N simuladas (Figura 3). Dardanelli (2002) reportó similares resultados al simular con CERES-Maize distintas dosis de fertilización nitrogenada para sectores diferenciados de un lote (loma, media-loma y bajo) hallando que la magnitud de las respuestas decrece desde la condición más favorable (bajo), hacia la menos favorable (loma). En la zona 1 se observó una leve subestimación del rendimiento, de todas maneras la tendencia fue similar a la observada (Figura 3a). En la zona 3, se observó una leve sobreestimación del rendimiento del cultivo de maíz (Figura 3c). Tanto en la zona 2 como en la 4 el modelo simuló la respuesta del rendimiento de maíz con mayor precisión (Figura 3b y 3d). Estos resultados son similares a los reportados por Basso et al. (2011) quien simuló la respuesta de trigo en tres zonas de alto, medio y bajo potencial de rendimiento.

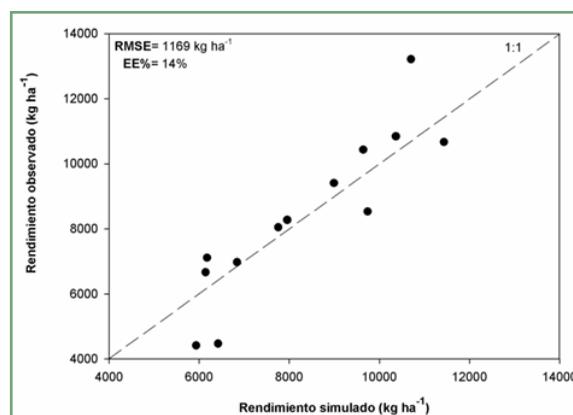


Figura 2. Rendimiento observado y simulado de 4 ensayos de fertilización nitrogenada conducidos en la EEA Paraná del INTA (2006-2009-2011-2012). La línea punteada indica la recta 1:1.

Simulación de la respuesta a la fertilización nitrogenada en maíz a largo plazo

En general, los testigos (0N) presentaron rendimientos más estables (CV 20-22%) y menores que los rendimientos simulados con las diferentes disponibilidades de fertilización por zonas variando entre 3500 y 4050 kg ha⁻¹. El rendimiento simulado con 70 kg N ha⁻¹ fue levemente más variable que el testigo (CV 21-24%) con valores entre 4300 y 5500 kg ha⁻¹. La disponibilidad de 140 kg N ha⁻¹ presentó rendimientos más variables (CV 22-27%) y mayores, entre 6000 y 7200 kg ha⁻¹. El rendimiento obtenido con 210 kg N ha⁻¹ en general fue mayor y mostró una mayor variabilidad (24-29%) en las 4 zonas evaluadas, con un rango entre 6500 y 8071 kg ha⁻¹. En general, los menores rendimientos se obtuvieron en la zona 3 y los mayores en la zona 4, mientras que en las zonas 1 y 2 se obtuvieron rendimientos intermedios.

La respuesta simulada fue más estable para el nivel de N a la siembra de 70 kg ha⁻¹, respecto a los otros niveles de N evaluados (Figura 4), con respuestas mayores a 750 kg ha⁻¹ en las zonas 3 y 4 y de 1500 kg ha⁻¹ en las zonas 1 y 2 en el 50% de los años (Figura 4 a). En el nivel de N disponible de 140 kg ha⁻¹ la respuesta fue más variable evidenciándose algunas diferencias entre zonas (Figura 4 b), en el 50% de los años es esperable que la respuesta sea mayor a 1000, 1500 y 1700 kg ha⁻¹, en las zonas 2, 1 y 3, y 4, respectivamente.

La variabilidad de la respuesta fue mayor con

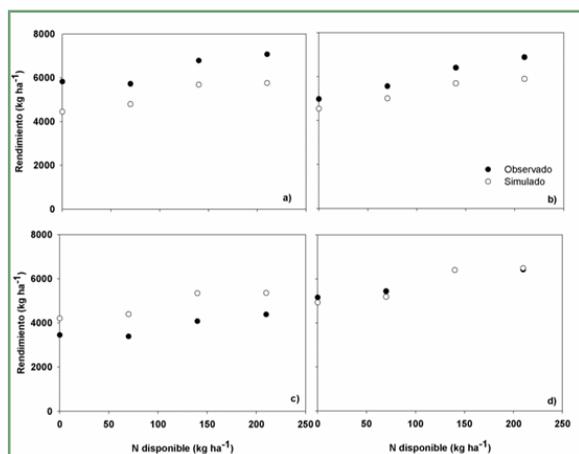


Figura 3. Rendimiento observado y simulado del cultivo de maíz en función de la disponibilidad de N a la siembra en zonas de un mismo lote con diferente productividad, a) zona 1, b) zona 2, c) zona 3 y d) zona 4. La simulación se realizó con el modelo SALUS.

el nivel de N disponible a la siembra de 210 kg ha⁻¹ (Figura 4 c) y las diferencias entre zonas más marcadas, especialmente en el 25% de los años con mayor respuesta. Al 50% de probabilidad de ocurrencia se observaron respuestas de 250 kg ha⁻¹ en las zonas 1 y 3, y de 600 y 1250 kg ha⁻¹, en las zonas 2 y cuatro, respectivamente.

Estos resultados indican que es esperable obtener respuesta a la fertilización en todas las zonas de manejo evaluadas, aunque la magnitud de la respuesta depende del potencial de la zona. Esto refuerza el concepto de que las dosis de N deberían ajustarse diferencialmente dentro de los

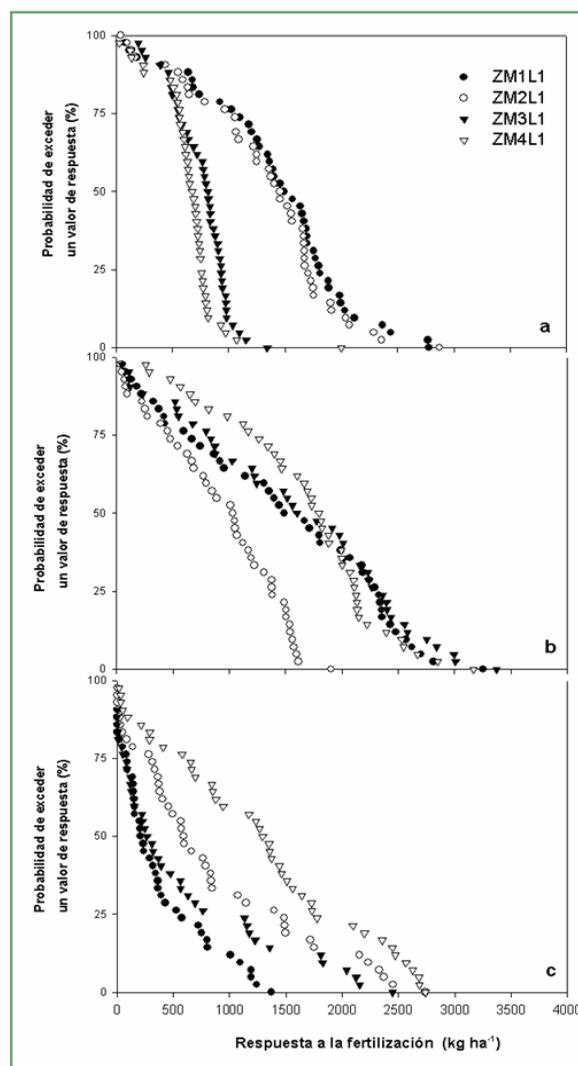


Figura 4. Probabilidad acumulada de alcanzar o exceder un valor de respuesta de maíz en simulaciones realizadas para un periodo de 30 años (1976-2006) con el modelo SALUS (Paraná, Argentina), para 4 ZM del Lote 1 y 3 niveles de N disponible a la siembra a) 70 kg N ha⁻¹, b) 140 kg N ha⁻¹ y c) 210 kg N ha⁻¹.

lotes, tal como ya han reportado trabajos previos (Muschetti Piana et al., 2010; Melchiori et al., 2009; Albarenque et al., 2009; Dardanelli, 2002).

El uso de dosis de N variables dentro de los lotes de producción no sólo tiene implicancias económicas por la mejora en la eficiencia de uso del insumo utilizado, sino también que es tiene importantes consecuencias sobre la reducción del impacto ambiental de la práctica tecnológica.

CONCLUSIONES

El modelo SALUS simuló adecuadamente el rendimiento del cultivo de maíz mostrando sensibilidad a los cambios en las zonas de manejo y a la disponibilidad de N. Los resultados obtenidos de la respuesta simulada del cultivo de maíz a la fertilización nitrogenada a largo plazo sugieren que sería conveniente el ajuste de dosis según zonas de manejo.

En consecuencia, el modelo SALUS se presenta como una herramienta promisoría para apoyar las decisiones en el ajuste de dosis de fertilización nitrogenada en el manejo por zonas de diferente potencial productivo.

BIBLIOGRAFÍA

- Albarenque, S.M, R.J.M. Melchiori, y O.P. Caviglia.** 2009. Utilización del modelo cereas-maize para la optimización de insumos en el manejo por ambientes. En: Melchiori R., Caviglia O., Albarenque S. & A. Kemerer (Eds). Jornada Nacional de Agricultura de Precisión: Integrando tecnologías para una agricultura sustentable.. Basso, B., Tien-Yin Chou, ChihYuan Chien, y MeiLing Yeh. 2012. I-SALUS: new web based spatial systems for simulating crop yield and environmental impact. ICPA
- Basso, B., J.T. Ritchie, D. Cammarano, y L. Sartori.** 2011. A strategic and tactical management approach to select optimal N fertilizer rates for wheat in a spatially variable field. *Europ. J. Agronomy* 35: 215– 222
- Basso, B.** 2005. Digital terrain analysis: data source, resolution and applications for modeling physical processes in agroecosystems. *Rivista Italiana di Agro-meteorologia* 5-14 (2)
- Dardanelli, J.L.** 2002. Utilización de modelos de simulación para el manejo sitio-específico. Tercer Taller Internacional de Agricultura de Precisión del Cono Sur de América, Carlos Paz, Córdoba.
- Doerge, T.A.** 1999. Management zone concepts. SSMG-2. En: Information Agriculture Conference, August 9-11, 1999, Stewart Center, Purdue, IN.
- Jones, C.A, y J.R. Kiniry.** 1986. CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development. Texas A&M University Press, College Station, TX, USA, p. 194.
- Jones, J.W., G. Hoogenboom, C. Porter, K.J. Boote, W.D. Batchelor, L.A. Hunt; P. Wilkens, U. Singh, A. Gijsman, y J.T. Ritchie.** 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.* v18, p. 235-265.
- Melchiori, R.J.M., S.M. Albarenque, G. Schulz, A.C. Kemerer, y D.J. Bedendo.** 2009. Delimitación de zonas de manejo mediante relevamiento de suelos y herramientas informáticas. En: Melchiori, RJM; O Caviglia; SM Albarenque & AC Kemerer (Eds). Jornada Nacional de Agricultura de Precisión: Integrando tecnologías para una agricultura sustentable.
- Melchiori, R.J.M.** 2007. Agricultura de precisión en Entre Ríos, aspectos relacionados con la sustentabilidad. En: Caviglia, OP; OF Papparotti & MC Sasal (Eds). Agricultura sustentable en Entre Ríos. p. 195-200.
- Miao, Y., D.J. Mulla, W.D. Batchelor, J.O. Paz, P.C. Robert, y M. Wiebers.** 2006. Evaluating management zone optimal nitrogen rates with a crop growth model. *Agron. J.* v98, p. 545-553.
- Mulla, D.J., y J.S. Schepers.** 1997. Key processes and properties for site-specific soil and crop management. En: The State of Site Specific Management for Agriculture. ASA-CSSA-SSSA. Madison WI. Ed: F.J. Pierce and E.J. Sadler. p. 1.
- Muschetti Piana, M.P., P.A. Cipriotti, H. Rimski-Korsakov, y S. Urricariet.** 2010. En: Actas del XXII Congreso Argentino de la ciencia del Suelo, Rosario, Argentina.
- Pierce, F.J., y P. Nowak.** 1999. Aspects of precision agriculture. In: D. Spark (Ed). *Advance in Agronomy* 67, Academic Press. p. 1-85.
- Rinaldi, M.** 2004. Water availability at sowing and nitrogen management of durum wheat: a seasonal analysis with the CERES-Wheat model. *Field Crops Res.* v89, p. 27-37.
- Ritchie, J.T., y S. Otter.** 1985. Description and performance of CERES-Wheat: a user-oriented wheat yield model. In: ARS Wheat Yield Project. ARS-38.Natl. Tech. Info. Serv., Springfield, MO, USA, pp. 159-175.
- Van Barneveld, G.W.** 1972. Los suelos de la Estación Experimental I.N.T.A. Paraná. Plan Mapa de Suelos Provincia de Entre Ríos. Proyecto PNUD/FAO/INTA ARG/68/526. 50 p.

[volver al índice](#)

Sumando tecnología a los cultivos de cobertura: Efectos de la fertilización nitrogenada sobre la producción de biomasa y eficiencia de uso de agua

C. Álvarez^{1*}, C. Cazorla², R. Fernández^{3,4}, R. Bagnato⁴, C.P. Lienhard⁴, T. Baigorria² y A. Quiroga^{3,4}
¹UE y DT Gral. Pico; ²EAA INTA Marcos Juárez; ³EAA INTA Anguil; ⁴Fac. Agronomía UNLPam ⁵Asesor privado.
 *Contacto: alvarez.cristian@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

En ambientes de producción semiáridos y subhúmedos, predominantes en la región pampeana, la capacidad de almacenar agua en los suelos durante períodos sin presencia de cultivos (barbechos) no supera el 25% la eficiencia de barbecho (A. Quiroga, com. Personal). El agua es uno de los factores de ambiente que más incide sobre la producción de los cultivos y es constante el desafío de conocer como el clima, los suelos y las interacciones entre su manejo y el manejo de los cultivos afectan su oferta y uso. Por lo tanto, conocer y cuantificar la disponibilidad de agua de los suelos es un factor de relevancia para la mejor planificación de estrategias de producción de cultivos. Si bien todos los factores mencionados pueden ejercer algún grado de influencia sobre la producción de granos, el peso relativo de los mismos normalmente varía entre sitios con distintas características edafoclimáticas. Identificar los factores más importantes (a nivel de sitio) y establecer cierto orden jerárquico en los mismos resulta imprescindible para sentar las bases del manejo del agua y optimizar la producción (interacción genotipo-ambiente) (Quiroga et al., 2007).

Uno de los cambios más relevantes y que esta marcando efecto sobre la eficiencia de captación y conservación de agua es la pérdida de cobertura a través de la intensificación de los sistemas de producción agrícolas y ganaderos debido a una mayor participación de cultivos de bajo aporte de volumen y/o la extracción de materia seca, casi completa, mediante el "pastoreo mecánico", como es el caso del silaje. Una manera de mitigar esta tendencia sería lograr una adecuada cobertura del suelo utilizando especies gramíneas de crecimiento invernal, como cultivos de cobertura (CC), en el prolongado tiempo que media entre la cosecha y la próxima siembra del cultivo de verano. Intercalar cultivos invernales, como CC, podría ser una alternativa para proveer de residuos ricos en carbono y promover al desarrollo

y al mantenimiento de la cobertura de los suelos (Quiroga et al., 2007).

El principal problema de ésta práctica es el uso del agua ya que, si no existe recarga del perfil durante el período de barbecho posterior al CC, podría transformarse en una limitante para el cultivo principal (Stute y Posner, 1995). En este sentido Rufo (2003) sostiene que, la decisión de finalizar el crecimiento de los CC debe adaptarse a dos premisas fundamentales: i) lograr una acumulación de biomasa que garantice cobertura y aportes de C y; ii) ajustarse a las precipitaciones de la región con la finalidad de garantizar la recarga del perfil. En muchos casos, los CC son fertilizados para lograr una mayor producción de biomasa y, de esta manera, aumentar el secuestro de C (Follett, 2001) y mejorar la cobertura del suelo. En estas condiciones, el manejo eficiente de los nutrientes en la secuencia de cultivos comerciales y CC será crucial para compensar costos adicionales de CC. En este sentido, el N es especialmente importante debido a las múltiples pérdidas que pueden ocurrir durante los periodos de barbecho y de cultivo (Tonitto et al., 2006). Por este motivo, se evaluó el impacto de fertilización nitrogenada sobre la producción de biomasa, dinámica y eficiencia de uso de agua en diferentes sitios de la región semiárida y subhúmeda pampeana.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en cinco sitios de la región semiárida pampeana (**Tabla 1**) entre el 2009 y 2012, en las localidades de Anguil e Intendente Alvear (LP) y Marcos Juárez (Córdoba) en lotes de producción con la finalidad de responder a los objetivos planteados anteriormente.

Los ensayos se sembraron con centeno (ciclo corto, diploide Quehue) entre el 10 de marzo y el 20 de mayo según año y localidad (**Tabla 2**), sobre antecesor girasol, soja y maíz, con una densidad de plantas logradas entre 200 y 250 pl/m². Además en cada sitio se dejó un tratamiento testigo (sin CC) el cual fue mantenido sin malezas aunque se le aplicó herbicida hasta el último momento de secado de las coberturas. Todos los tratamientos con tres repeticiones en el espacio. Se fertilizó el CC con Urea en una dosis de 40 hasta 100 kg N ha⁻¹. La determinación de materia seca (MS) se realizó al momento de secado desde junio hasta octubre en función del sitio (**Tabla 2**).

Los resultados se cotejaron a través del test de medias T, y análisis de varianza (ANOVA) bajo un diseño en bloques completamente aleatorizados y la existencia de diferencias medias fue comparada por el test de LSD ($p \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se observaron diferencias en la producción de MS de los CC entre sitios, momento de secado y nivel de fertilización variando la producción de biomasa entre 2900 y 11100 kg ha⁻¹ (**Tabla 3**). La fertilización en todas fechas de secado incrementó la producción de MS entre un 41 y 70%. Se comprobó además que el momento de secado para la zona hizo variar la productividad de los CC, observándose en secados más tardíos mayor producción. En Hapludoles y Haplustoles de la región pampeana semiárida, la fertilización produce mejoras en producción y por lo tanto en la eficiencia en el uso del agua (EUA) en gramíneas, debido a que tiene un impacto mayor sobre la producción de MS que sobre el consumo de agua en el suelo, lo que lleva a aumentar la EUA (Quiroga et al., 2007). La eficiencia de uso de Nitrógeno (EUN) varió entre 7,5 y 56,5 kg MS*kg

Tabla 1. Caracterización de los sitios bajos estudio en base a tipo de suelo, textura, contenidos de arcilla + limo (A+L), materia orgánica (MO), fósforo extractable (P) y pH. La Pampa (LP), Córdoba (Cba).

Sitio	Tipo de suelo	Textura	A+L (%)	MO (%)	P (ppm)	pH
Anguil (LP)	Haplustol Petrocalcico	Franco	45	1,5	21	7,1
Int. Alvear (LP)	Haplustol Éntico	Franco arenoso	30	2,1	30	6,6
Marcos Juárez (Cba)	Argiudol Típico	Franco Limoso	94	2,4	36	6,2

Tabla 2. Sitios, antecesor, fecha de siembra y secado y nivel de fertilización nitrogenada.

Sitio	Antecesor	Plantas m ²	Fecha de siembra	Fecha de secado	Fertilización (kg N ha ⁻¹)
Anguil (LP)	Girasol	200	10 de marzo	15 de junio, julio y agosto	40
Int. Alvear (LP)	Girasol	220	20 de marzo	10 de agosto, septiembre y octubre	46
Marcos Juárez (Cba)	Maíz	200	20 de mayo	30 de septiembre	100
	Soja	200	25 de abril	20 de septiembre	100

Tabla 3. Producción de MS (kg ha⁻¹); incremento respecto al testigo (%) y eficiencia de uso de nitrógeno por sitio, fecha de secado y fertilización. Letras minúsculas diferentes en sentido horizontal indican diferencias significativas entre tratamiento de fertilización dentro de la fecha de secado y sitio fertilizado (CF) y sin fertilización (SF).

Sitio	Secado CC	MS (kg ha ⁻¹)		Incremento respecto al testigo (%)	EUN (kg MS kg N aplicado ⁻¹)
		SF	CF		
Anguil (LP)	Junio	2900 a	3200 a	10.3	7.5
	Julio	4000 a	4700 b	17.5	17.5
	Agosto	5000 a	6000 b	20.0	25
Int. Alvear (LP)	Agosto	4496 a	7023 b	56.0	54.9
	Septiembre	5332 a	7209 b	35.0	40.8
	Octubre	5700 a	8900 b	36.0	69.6
Marcos Juárez (Cba)	Septiembre	6379 a	7750 b	21.5	13.7
	Octubre	5251 a	9013 b	71.6	37.6

N aplicado⁻¹ (**Tabla 3**), estos niveles fueron observados por Sa Pereyra et al. (2012), Scianca et al. (2013), y Fernández et al. (2012).

Según Passioura (1977), la producción de biomasa de un cultivo depende de cómo éste capta el recurso agua y de cuán eficiente es en transformarlo en MS (EUA). En relación a la EUA a medida que se demoró el secado del cultivo la eficiencia fue menor, pasando de eficiencias 46 a 22 kg MS mm⁻¹ (**Tabla 4**). También hubo diferencias entre sitios mostrando mayores EUA los momentos de secados más tardíos en Int. Alvear y Marcos Juárez. Neal et al., (2011) propusieron que especies de rápido crecimiento y/o niveles de fertilización en gramíneas mejoran la EUA, ya que cubren el suelo rápidamente, evitando pérdidas de agua por evaporación directa desde el suelo y optimizando la relación entre tasa de crecimiento del cultivo (TCC) y biomasa (Prasad y Power 1991).

El efecto de la fertilización en la EUA fue superior en suelos arenosos, práctica que también permite adelantar la fecha de secado (**Tabla 3**), el sitio Anguil para lograr 4000 kg MS ha⁻¹ por ejemplo un mes antes por efecto fertilización. El uso de fertilizantes tiene una eficacia notable en la producción y la EUA de los cultivos (Zhang et al., 1998). Algo similar ocurrió en el trabajo de Bertolla et al. (2012), donde la aplicación de fertilizantes nitrogenados incrementó la MS, la EUA y en TCC en el caso de las gramíneas. Respuestas similares del N sobre la biomasa, en estos cultivos han sido reportadas previamente por Scianca et al. (2008) y Díaz-Zorita y Gonella (1997). Esta respuesta puede ser debida a que la aplicación de fertilizantes

nitrogenados aumenta la concentración de N en las plantas aumentando la capacidad fotosintética del cultivo, provocando mayor TCC en períodos tempranos, dando por resultado incrementos en la EUA (Dardanelli et al., 2008). Scianca et al., (2010), en cultivo de centeno utilizado como CC en un suelo Argiudol típico, registró valores de EUA entre 37 y 54 kg MS mm⁻¹ ha⁻¹, mientras que en un Hapludol thapto árgico las EUA oscilaron entre 9 y 30 kg MS mm⁻¹ ha⁻¹. Frasier et al. (2009) evaluaron la producción de centeno Quehué como CC hasta encañazón sobre un Haplustol éntico y obtuvieron valores de EUA de 35 kg MS mm⁻¹ ha⁻¹.

El uso consuntivo varió entre 140 y 262 mm entre sitios evaluados, en tanto que el momento de secado y la fertilización no hicieron variar este parámetro (**Tabla 4**). En la región semiárida pampeana Fernández et al. (2010) obtuvieron altas EUA de los CC y también se reflejó en que su UC promedio fue tan solo de 84 mm. Scianca, (2010) trabajando en centeno como CC en la región semiárida pampeana, encontró un valor similar (88 mm), mientras que en la misma zona y el mismo cultivo, Fernández et al., (2007) cuantificaron 150 mm de UC.

CONCLUSIONES

El uso de CC en suelos de textura arenosa a franco limosa es factible, evitando pérdidas por evaporación en barbechos largos y aportando cobertura a sistemas donde ésta es escasa.

El momento de secado impacta significativamente sobre la productividad total de cada sitio. La fertilización permitió incrementar significativamente la producción de MS en los diferentes sitios

Tabla 4. Uso consuntivo (UC, mm) y eficiencia de uso de agua de las coberturas (EUA, kg MS mm⁻¹ha⁻¹) para los sitios, fechas de secado y fertilización de los cultivos de cobertura. La Pampa (LP), Córdoba (Cba). Letras diferentes en sentido horizontal indican diferencias significativas entre tratamiento de fertilización nitrogenada dentro de cada sitios. CF=fertilizado y SF=sin fertilización

Sitio	Secado CC	UC (mm)		EUA (kg MS mm ⁻¹ ha ⁻¹)	
		SF	CF	SF	CF
Anguil (LP)	Junio	140 a	140 a	20.7 a	22.9 a
	Julio	140 a	140 a	28.6 a	33.6 a
	Agosto	160 a	160 a	31.3 a	37.5 b
Int. Alvear (LP)	Agosto	112 a	153 a	40.0 a	46.0 a
	Septiembre	178 a	176 a	30.0 a	41.0 b
	Octubre	295 a	247 a	19.3 a	36.0 b
Marcos Juárez (Cba)	Octubre	295 a	296 a	21.6 a	26.2 a
	Septiembre	217 a	217 a	24.2 a	41.5 b

entre un 10 a 71%, mientras que la EUN fue entre 7.5 y 70 kg Ms kg N aplicado⁻¹.

La EUA mejoró entre un 22 y 70% por efecto de la fertilización, mientras que a medida que atrasamos la fecha de secado la misma disminuye solo dentro de los sitios Int. Alvear y Marcos Juárez.

Por lo tanto, se necesitaría continuar con los estudios de CC para entender mejor la contribución que hacen estos a la dinámica hídrica global del sistema suelo y a la sustentabilidad ambiental a través de la reducción en la fertilización a través de su doble uso, primero para generar biomasa dentro del CC y después entregar parte del N retenido en biomasa al cultivo siguiente, además de cuantificar el uso de otros nutrientes en diferentes ambientes agroecológicos.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez, C., C. Scianca, M. Barraco, y M. Díaz-Zorita.** 2006. Impacto de cereales de cobertura sobre propiedades edáficas y producción de soja. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. I Reunión de suelos de la región Andina. Salta -Jujuy. Pág 424.
- Bertolla, A., T. Baigorria, D. Gómez, C. Cazorla, M. Cagliero, A. Lardone, M. Bojanich, y B. Aimetta.** 2012. Efecto de la fertilización sobre la eficiencia del uso del agua de especies invernales utilizadas como cultivos de cobertura. Tesina de grado UNRC. CD.
- Dardanelli, J., D. Collino, M.E. Otegui, y V. Sadras.** 2008. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. En **Satorre, E; Benech, R; Slafer, G; de la Fuente, E; Millares, D; Otegui, M.E; Savin, R** (Eds.). Producción de granos bases metodológicas. UBA. Argentina. pp. 376-433.
- Díaz-Zorita, M. y Gonella, C.** 1997. Fertilización nitrogenada de verdes de invierno en la región subhúmeda pampeana. Argentina. Arch. Latinoam. Prod. Anim. 5 (Supl. 1). pp. 10-12.
- Duarte, G.** 2002. Sistemas de Producción de girasol en la región húmeda argentina. en Díaz-Zorita M. y Duarte G. (Eds.). Manual práctico para el cultivo de girasol. Hemisferio sur. Buenos Aires. pp. 313.
- Fernández R, A Quiroga, F Arenas, C Antonini, M Saks.** 2007. Contribución de los cultivos de cobertura y las napas freáticas a la conservación del agua, uso consuntivo y nutrición de los cultivos. Manual de fertilidad y evaluación de suelos. Publicación Técnica N° 71. EEA INTA Anguil. Capítulo V.
- Fernández R, D Funaro, A Quiroga.** 2005. Influencia de cultivos de cobertura en el aporte de residuos, balance de agua y contenido de nitratos. Boletín de divulgación Técnica N° 87. EEA INTA Anguil.
- Fernández R, J Saks, J Arguello, A Quiroga, E Noellemyer.** 2010. Cultivo de cobertura, ¿una alternativa viable para la Región Semiárida Pampeana?
- Frasier I, Fernández R y A Quiroga.** 2009. Valoración de especies invernales como cultivos de cobertura. Sistemas Productivos Sustentables. Fósforo, Nitrógeno y Cultivos de Cobertura". Bahía Blanca. 10 y 11 de agosto.
- Kuo, S; Sainju, U; Jellum, E.** 1997. Winter cover cropping influence on nitrogen in soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 61. pp. 1392-1399.
- Lampurlanes, J; Angás, P; Cantero-Martínez, C.** 2002. Tillage effects on water storage during fallow, and on barley root growth and yield in two contrasting soils of the semi-arid Segarra region Spain. Soil Till. Res. 65. pp. 207-220.
- McCracken, D; Smith, M; Grove, J; MacKown, C; Blevins, R.** 1994. Nitrate leaching as influenced by cover cropping and nitrogen source. Soil Sci. Soc. Am. J. 58. pp. 1476-1483.
- Meisinger, J; Hargrove, W; Mikkelsen Jr. R; Williams, J; Benson, V.** 1991. Effects of cover crops on groundwater quality. In: Hargrove, W.L. (Ed.), Cover Crops for Clean Water. Soil and Water Conservation Society. Ankeny. IA. pp. 57-68.
- Miranda, W; C Scianca; M Barraco; C Álvarez; A Lardone.** 2012. Cultivos de cobertura: dinámica del agua luego de dos momentos de secado. Congreso lanitno americano y de la ciencia del suelo Argentina. CD
- Neal, J; Fulkerson, W; Hacker, R.** 2011. Differences in water use efficiency among annual forages used by the dairy industry under optimum and deficit irrigation. Aust. Agricultural Water Management 98. pp. 759-774.
- Nyakatawaa E; Reddy, K; Sistani, K.** 2001. Tillage, cover cropping, and poultry litter effects on selected soil chemical properties. Soil. Till. Res. 58. pp. 69-79.
- Passioura, J.** 1977. Grain yield, harvest index and water use of wheat. J. Aust. Inst. Agric. Sci. 43. pp. 117-120.
- Payne, W; Drew, M; Hossner, L; Lascano, R; Onken, A; Wendt, C.** 1992. Soil phosphorus availability and pearl millet water-use efficiency. Crop Sci. 32. pp. 1010-1015.
- Prasad, R y Power, J.** 1991. Crop residue management. Advances in Soil Sc 15. pp. 205-241.
- Quiroga, A; Carfagno, P; Eiza, M; Michelena, R.** 2007. Inclusión de cultivos de coberturas bajo agricultura de secano en la región semiárida pampeana. EEA INTA General Villegas. Jornada de cultivos de cobertura. Septiembre 2007.
- Quiroga, A; Ormeño, O; Fernández, D; Vallejo, A.** 1999. Verdeo de invierno: necesidad de reconocer y manejar limitantes de su productividad en suelos de la región semiárida pampeana. Bol. Téc 61. INTA Anguil.
- Reicosky D y Archer D.** 2005. Cuantificación agronómica del aumento de materia orgánica del suelo en siembra directa. En: XIII Congreso AAPRESID. Rosario (Santa Fe). 9-12 de agosto de 2005.
- Restovich, S; Andriulo, A; Salsa, C; Irizar, A; Rimotori, F; Darder, M.L; Hanuch, L.** 2008. Absorción de agua y de nitrógeno edáfico de diferentes cultivos de cobertura. XXI Congreso Argentino de la ciencia del suelo. Potrero de los Funes. San Luis. 13 al 16 de mayo del 2008.
- Ruffo, M.** 2003. Factibilidad de inclusión de cultivos de cobertura en Argentina. Actas XI Congreso de AAPRESID. pp. 171-176
- Scianca C.** 2010. Cultivo de cobertura en Molisoles de la región pampeana: Aporte de carbono e influencia sobre propiedades edáficas y dinámica de malezas. Tesis Magister en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca. 80 Pág.
- Scianca, C; Barraco, M; Álvarez, C.** 2008. Estrategias de manejo de centeno utilizado como cultivo de cobertura en un Argiudol típico del noreste bonaerense. Memoria técnica 2008 - 2009. EEA INTA General Villegas. pp. 25-28.
- Strock, J; Porter, P; Russelle, M.** 2004. Cover cropping to reduce nitrate loss through subsurface drainage in the northern U.S. Corn Belt. J. pp. 1010-1016
- Stute, J. y Posner, J.** 1995. Synchrony between Legume Nitrogen Release and Corn Demand in the upper Midwest. Agron. J. 87. pp. 1063-1069
- Zhang, H; Oweis, T; Garabet, S; Pala, M.** 1998. Water-use efficiency and transpiration efficiency of wheat under rainfed conditions and supplemental irrigation in a Mediterranean-type environment. Plant and Soil 201. pp. 295-305.

[volver al índice](#)

Pérdidas de fósforo total de suelos pampeanos inducidas por el uso agrícola

Roberto Alvarez^{1,2}, María M. Caffaro^{1,2}, Cecilia D. Molina¹, Denise A. Ramil¹, Gonzalo Berhongaray³ y Haydée S. Steinbach¹

¹Facultad de Agronomía-Universidad de Buenos Aires, Av. San Martín 4453 (1417) Buenos Aires, Argentina; ²CONICET, Argentina;

³Pleco-Universidad de Amberes, Bélgica.

*Contacto: ralvarez@agro.uba.ar

INTRODUCCIÓN

El uso agrícola de los suelos pampeanos ha determinado una disminución muy importante de su nivel de fósforo (P) extractable (Alvarez et al., 2013). Esta disminución ronda un 75% y es significativa hasta 75 cm de profundidad. Puede atribuirse la misma al escaso uso de fertilizantes fosforados que generó históricamente un balance negativo de P en la región (Viglizzo et al., 2001; García y González Sanjuán, 2013). En algunos sitios y experimentos aislados se ha determinado también el impacto de la agricultura sobre otras formas del P del suelo en la capa superficial (Buschiazzi et al. 2000; Galantini y Rosell, 1997), pero la escasa información disponible no permite establecer los efectos del cultivo de los suelos sobre las reservas totales de P.

El P extractable no sobrepasa generalmente una concentración de algunas pocas decenas de partes por millón en los suelos de la Región Pampeana (Alvarez et al. 2013; Sainz Rozas y Echeverría, 2008), mientras que el P total llega comúnmente a valores de cientos de partes por millón (Barreira y Lopez Domínguez, 1969; Boschetti et al. 2000; Culot y Bolaño, 1967). El primero está fuertemente estratificado (Alvarez et al. 2013) y el segundo no (Barreira y Lopez Domínguez, 1969; Boschetti et al. 2000; Culot y Bolaño, 1967). Como consecuencia, los efectos descriptos de la agricultura sobre el P extractable afectan una pequeña porción del total de P de los suelos. Qué impacto ha tenido el uso agrícola sobre el P total no ha sido estudiado a nivel regional hasta el momento. Nuestro objetivo fue evaluar cómo han variado las reservas de P total de los suelos pampeanos por el cultivo en las capas superficiales y profundas del perfil.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron muestras tomadas de 37 establecimientos productivos de la Región Pampeana

en 2007-2008 (**Figura 1**). Los mismos representaban una amplia gama de condiciones de clima y suelo (**Tabla 1**). En cada establecimiento se eligió como tratamiento control, nunca cultivado, el parque del casco, bajo vegetación graminoide y lejos de árboles y construcciones. Lotes agrícolas cercanos fueron seleccionados para definir el efecto de la agricultura sobre el fósforo. En cada establecimiento se eligieron dos lotes agrícolas, uno que estuviera en la fase agrícola de una rotación mixta y otro que estuviera en la fase pastoril de la rotación. Tanto el parque como los sitios agrícolas pertenecían en casi todos los casos a la misma serie de suelo. Los detalles del muestreo y procesamiento de muestras han sido extensamente descriptos en Berhongaray et al. (2013). Brevemente: de cada sitio de muestreo se tomaron cuatro muestras por estrato de 25 cm de profundidad, hasta 1 m, que fueron compuestas. Las muestras se secaron al aire, molieron y tamizaron por 2 mm. Se determinó la concentración de P extractable por la técnica de Bray-1 (Bray y Kurtz, 1945) y P total por digestión con ácido perclórico (Kuo, 1996). Los resultados se transformaron a masa de fósforo por unidad de superficie usando la densidad aparente de cada muestra. Los datos fueron analizados estadísticamente por el test no paramétrico de Kruskal-Wallis debido a que la distribución no era normal y los problemas para lograr normalidad usando las transformaciones comunes. El nivel de significancia fue del 5%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los niveles de P total presentaron un rango de variación muy amplio en las muestras (**Tabla 1**) sin un claro perfil de estratificación en profundidad. Esto ya ha sido observado en los suelos pampeanos (Barreira y Lopez Domínguez, 1969; Boschetti et al., 2000; Culot y Bolaño, 1967). Contrariamente, el P extractable estaba muy estratificado como también ya ha sido reportado en varios estudios locales previos (Alvarez et al., 2013; Alvarez y Steinbach, 2012). La fracción

extractable representó en promedio el 5% del total de P del suelo.

No se detectaron diferencias significativas entre los niveles de P extractable o total entre los suelos

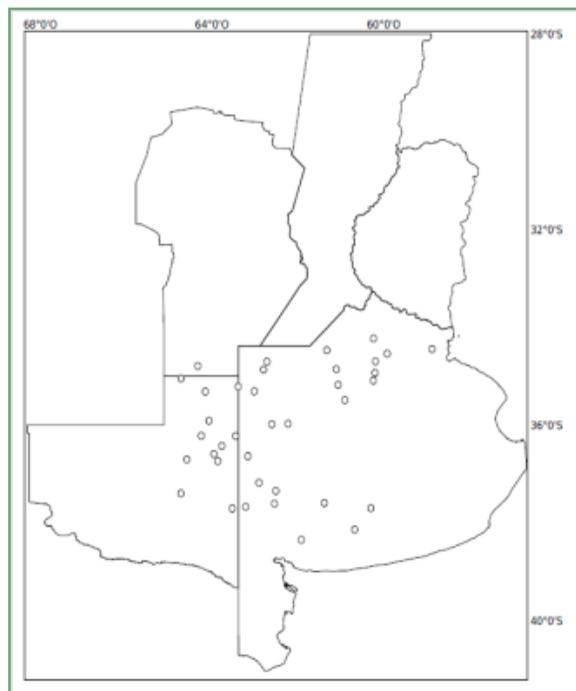


Figura 1. Ubicación de los establecimientos muestreados.

de las fases agrícola y pastoril de las rotaciones por lo que se agruparon esas situaciones. Sí hubo diferencias significativas entre los suelos no cultivados y cultivados. El uso agrícola determinó una disminución significativa de las concentraciones de P total y extractable de los suelos hasta 75 cm de profundidad (**Figura 2**). Las pérdidas de P total fueron unas tres veces mayores a las de la fracción extractable y en ambos casos los perfiles de disminución de P mostraron una marcada estratificación con caídas en la capa superficial del suelo que duplicaban a las producidas en profundidad (**Figura 2**). La disminución relativa de las concentraciones de P mostró una tendencia diferente. Mientras que el P extractable cayó bajo cultivo al 25% del nivel de los suelos no cultivados, las pérdidas de P total fueron del 20-30% según el estrato de profundidad considerado (**Figura 2**). La fracción extractable fue mucho más afectada por el uso agrícola que el total de P edáfico. Como consecuencia, decreció bajo cultivo unas tres veces la proporción de P extractable respecto del total (**Figura 3**).

La biomasa de raíces de los cultivos está fuertemente estratificada en profundidad (Jackson et al., 1996) determinando una estratificación de los procesos de absorción (Cabelguenne y Debaeke, 1998). Por estos motivos es esperable que las

Tabla 1. Valores representativos de algunas características de clima de los sitios muestreados y principales características de las muestras de suelo.

Variable	Mínimo	Media	Máximo
Temperatura media anual, C°	13.6	15.4	16.5
Precipitación media anual, mm	564	792	1068
Densidad aparente, g ml ⁻¹	0.68	1.23	1.67
pH (1:2.5)	4.4	6.8	8.9
Conductividad, dS m ⁻¹	0.18	0.94	10.45
Arcilla, g kg ⁻¹	12	115	470
Limo, g kg ⁻¹	80	313	540
Arena, g kg ⁻¹	230	572	900
Carbono orgánico, %	0.19	0.85	4.05
Nitrógeno total, %	0.01	0.09	0.35
Fósforo extractable, ppm	0.3	19.3	192
Fósforo total, ppm	15	345	1220

pérdidas de P sean mayores en las capas superficiales de los suelos como se observó aquí. Debe considerarse además que los suelos pampeanos han perdido un 15% de su contenido de materia orgánica en los primeros 50 cm del perfil (Berhongeray et al., 2013) y que un 30-60% del P del suelo está en la materia orgánica (Alvarez y Steinbach, 2012). Por ello también son esperables mayores pérdidas de fósforo por efecto de la agricultura en superficie asociadas a la disminución de la misma.

CONCLUSIONES

La masa de P total perdida por efecto de la agricultura fue en promedio de 840 kg ha⁻¹ hasta 1 m de profundidad en los sitios muestreados. De ésta masa 310 kg P ha⁻¹ correspondían al P extractable cuantificado como P Bray-1 (Bray y Kurtz, 1945). Estos resultados muestran que el impacto del uso agrícola sobre la fertilidad fosforada de los suelos pampeanos es mucho mayor al descrito hasta el momento, en que solo se habían evaluado los cambios en el fósforo extractable. Como se indicó anteriormente, las pérdidas totales son unas tres veces mayores a las que se registran en la fracción extractable.

BIBLIOGRAFÍA

Alvarez, R., y HS Steinbach. 2013. Fósforo orgánico en agrosistemas. En: Fertilidad de Suelos. Caracterización y Manejo en la Región Pampeana. Ed. FAUBA, Buenos Aires, pág. 333-347.

Alvarez, R., H.S. Steinbach, G. Berhongeray, y R. Cantet. 2013. Cambios en los niveles de fósforo extractable de los suelos pampeanos por el uso. Actas Simposio Fertilidad: Nutrición de Cultivos para la Intensificación Agrícola Sustentable, pág. 146-150.

Barreira, E.A., y H. Lopez Domínguez. 1969. Fósforo ligado al aluminio, hierro y calcio en perfiles de suelo de la Región Pampeana Húmeda. V Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo, actas: 256-260

Berhongeray, G., R. Alvarez, J.L. De Paepe, C. Caride, y R. Cantet. 2013. Land use effects on soil carbon in the Argentine Pampas. Geoderma 192: 97-110.

Boschetti, N.G., R. Valente, C. Vesco, y M. Sione. 2000. Contenidos de fósforo total en suelos con características vérticas de la Provincia de Entre Ríos. Rev. Fac. Agron. (UBA) 20: 53-58

Buschiazzo, D.E., G.G. Hevia, M. Urioste, y E.N. Hepper. 2000. Cultivation effects on phosphate forms and sorption in loess-soils of Argentina. Soil Science 165: 427-436.

Cabelguenne, M., y P. Debaeke. 1998. Experimental determination and modelling of the soil water extraction capacities of crops of maize, sunflower, soya bean, sorghum and wheat. Plant Soil 202: 175-192.

Culot, P., y A.A. Bolaño. 1967. Estudio del estado del fósforo en los suelos del Sudeste Bonaerense. INTA Balcarce, 8 pág.

Galantini, J.A. y R.A. Rosell. 1997. Organic fractions, N, P, and S changes in an argentine semiarid Haplustoll under different crop sequences. Soil till. Res. 42: 221-228.

García, F.O., y M.F. González Sanjuán. 2013. La nutrición de suelos y cultivos y el balance de nutrientes: ¿Como estamos?. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica No. 9 – Marzo 2013. Acassuso, Buenos Aires, Argentina: 2-7.

Jackson, R.B., J. Canadell, J.R. Ehleringer, y H.A. Mooney. 1996. Oecologia 108: 389-411. <http://link.springer.com/article/10.1007/BF00333714>

Kuo, S. 1996. Phosphorus. En: Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods. DL Sparks et al. eds. SSSA Book Series n° 5. Wi, USA, pág. 869-919.

Sainz Rozas, H., y H.E. Echeverría. 2008. Relevamiento de la concentración de fósforo asimilable en suelos agrícolas de la región Pampeana y Extrapampeana. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis. Actas en CD.

Viglizzo, E.F., F. Lértora, A.J. Pordomingo, J.N. Bernardos, Z.E. Roberto, y H. del Valle. 2001. Ecological lessons and applications from one century of low external-input farming in the pampas of Argentina. Agric. Ecosys. Environm. 83: 65-81.

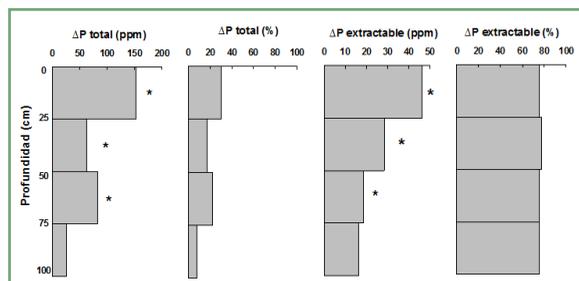


Figura 2. Disminución de los pooles de fósforo total (ΔP total) y fósforo extractable (ΔP extractable) en suelos pampeanos debido al uso agrícola. Se han calculado como la diferencia de contenidos de fósforo del control no cultivado y los sitios cultivados. Entre las fases agrícola o pastoril de las rotaciones no se detectaron diferencias significativas por lo que se agruparon. Los cambios se presentan en concentración de fósforo y como fracción relativa al contenido del suelo control no cultivado. Los asteriscos indican en qué estratos de profundidad las diferencias eran significativas y, por simplicidad, solo se han graficado en las subfiguras que presentan concentración.

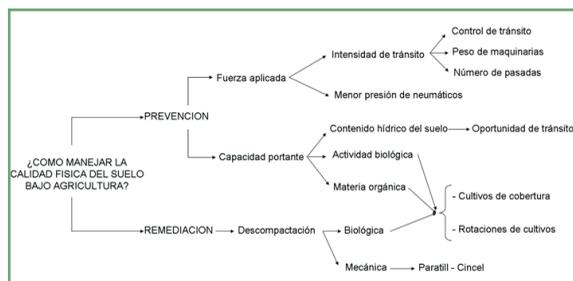


Figura 3. Proporción del fósforo total en la fracción extractable ((P extractable/P total)*100) en función de la profundidad del perfil. Entre las fases agrícola y pastoril de las rotaciones no se detectaron diferencias significativas por lo que se agruparon.

[volver al índice](#)

Contribución de la fertilización con nitrógeno, fósforo y azufre a la productividad de maíz en la Pampa Arenosa

Mirian Barraco¹, Martín Díaz Zorita², Walter Miranda¹ y Cristian Álvarez³

¹ EEA INTA General Villegas, ² Monsanto BioAg, ³ AER General Pico, INTA Anguil

*Contacto: barraco.miriam@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

Los cultivos agrícolas ocupan alrededor del 50% de la superficie de la Pampa Arenosa (RPA) y particularmente en los Partidos de Oeste de Buenos Aires alrededor del 80% de la superficie potencialmente cultivable (suelos de capacidad de aptitud de uso II, III y IV) (Zaniboni, 2012). Si bien la soja es el principal cultivo de la región resulta relevante el área sembrada con maíz (17 al 20%), ya que constituye la principal gramínea que aporta elevados niveles de residuos a los sistemas productivos. Generalmente el cultivo se desarrolla sobre suelos de textura franca a franca arenosa, (porcentaje de arena entre 50 y 70%), bien drenados, con bajos a medios contenidos de materia orgánica (MO: 18 a 25 mg kg⁻¹ en el horizonte superior) y con moderada capacidad de almacenaje de agua. Al igual que otras zonas de la Región Pampeana, la intensificación de la agricultura mediante el empleo de genotipos de mayor potencial ha incrementado la demanda de nutrientes, por lo que la fertilización resulta una práctica de gran importancia para maximizar los rendimientos y la rentabilidad del cultivo.

En siembras de primera los suelos presentan bajos contenidos de nitrógeno (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 del rendimiento. Se ha encontrado respuesta con umbrales de 119 a 140 kg ha⁻¹ de N disponible (N suelo + N fertilizante), dependiendo del tipo de suelo (Barraco y Díaz Zorita, 2006).

Al igual que en el resto de la Región Pampeana los niveles de fósforo (P) han disminuido por la continua extracción de los cultivos y su escasa reposición. Sainz Rosas et al., (2012) sobre un total de 7519 muestras relevadas en varios Partidos del Oeste de la Provincia de Buenos Aires reportaron que el 50% de los lotes presentaban niveles de P inferiores a 11,4 mg kg⁻¹ y el 75% niveles inferiores a 16,8 mg kg⁻¹. Si se considera que el umbral crítico para obtener respuesta en maíz es de 15 a 16 mg kg⁻¹ (García et al., 2007), estos resultados sugieren que el nivel de P actual de esta región podría ser limitante para la producción de los cultivos.

En cuanto a los contenidos de azufre (S) de los suelos en general son bajos, (dado la textura arenosas y los contenidos bajos a medios de MO); sin embargo, no se han observado relaciones significativas entre éstos indicadores y la respuesta al agregado de S (Barraco et al., 2009), de manera coincidente a lo observado en otras áreas de la Región Pampeana (Reussi Calvo et al., 2006; Gentilini y Gutiérrez Boem (2004). En cambio, en la RPA se han observado respuestas al agregado de S en pasturas, verdes de invierno, trigo/soja de segunda (Bono et al., 1997, Mendez et al., 1998; Barraco et al., 2009; Barraco et al., 2013), siendo escasos los estudios de respuesta en el cultivo de maíz.

Durante el período 2001-2012 se desarrollaron en la RPA numerosos estudios que evaluaron la respuesta del cultivo de maíz a diferentes dosis y estrategias de fertilización con N, P y S que fueron analizadas en forma individual. El objetivo de este trabajo es integrar estos estudios de manera de establecer la contribución de la fertilización con estos nutrientes en la producción del cultivo de maíz.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los experimentos fueron desarrollados entre las campañas 2001/02 y 2011/12 en lotes de producción de la RPA. Todos los sitios fueron conducidos bajo prácticas de siembra directa y sobre suelos sin limitantes físicas en el perfil hasta por lo menos los 200 cm de profundidad (suelos Hapludoles típicos y Hapludoles énticos). En cada sitio se evaluó la respuesta a un solo nutriente en condiciones no limitantes de otros. Los ensayos se dispusieron en bloques completos al azar, y en todos los casos se sembraron híbridos de maíz con alto potencial de rendimiento. Los resultados se analizaron para cada sitio mediante ANOVA y test de diferencias de medias de LSD ($p < 0,05$). Las eficiencias de uso de los nutrientes se calcularon como la diferencia de rendimiento entre el tratamiento fertilizado y el testigo, dividida por la cantidad de nutriente aplicado.

Ensayos de respuesta a N

Se analizaron 38 ensayos de fertilización nitrogenada con 2 a 5 dosis de N evaluadas según el sitio (0 hasta 200 kg N ha⁻¹), lo que permitió definir 127 situaciones de N disponible (Nd) como resultado de la combinación de sitios y niveles de N aplicados en estadios de V4 o V6 de los cultivos. En todos los casos la fuente de N utilizada fue urea. En cada ensayo se analizaron los contenidos de N de nitrato previo a la fertilización en capas de 0 a 20, 20 a 40 y 40 a 60 cm y se cuantificó el Nd expresado en kg N ha⁻¹, utilizando una densidad media de 1,28, 1,30 y 1,30 g cm⁻³ para los estratos de 0 a 20, 20 a 40 y 40 a 60 cm, respectivamente. En todos los ensayos se aseguraron condiciones no limitantes de P y S, aplicando entre 18 y 27 kg P ha⁻¹ y 20 kg S ha⁻¹. Para el análisis en conjunto se empleó un índice relativo de producción de grano (RR) como el cociente entre el rendimiento de cada tratamiento y el máximo obtenido en cada ensayo.

Ensayos de respuesta a P

Se analizaron 16 ensayos de fertilización con dos tratamientos: testigo sin fertilizar (sin P) y fertilizado (con P). La dosis de P aplicada varió entre 16 y 24 kg de P ha⁻¹ según el sitio y en todos los casos se aplicaron en forma incorporada al costado de la línea de siembra. La fuente de P utilizada fue fosfato monoamónico o superfosfato triple de

calcio. Los cultivos se manejaron sin limitantes de N (Nd > 140 kg N ha⁻¹) y con aplicaciones de 12 kg S ha⁻¹. Se determinaron los niveles de P extractable de los suelos (Pe, Bray y Kurtz 1), y las precipitaciones durante el ciclo de los cultivos. El diseño fue en bloques completos al azar con 3 y 4 repeticiones según el sitio.

Ensayos de respuesta a S

Se analizaron 11 ensayos de fertilización con dos tratamientos: testigo sin fertilizar (sin S) y fertilizado con 12 kg S ha⁻¹ (con S). La fuente de S utilizada fue sulfato de calcio. Los cultivos se manejaron sin limitantes de N (Nd > 140 kg N ha⁻¹) y con aplicaciones de entre 18 y 22 kg de P ha⁻¹. Se determinaron los niveles de S de sulfato de los suelos (0 a 20, 20 a 40 y 40 a 60 cm). El diseño fue en bloques completos al azar con 3 y 4 repeticiones según el sitio.

RESULTADOS

Ensayos de respuesta a N

Los contenidos de N de nitrato previo a la fertilización variaron entre 30 y 109 kg N ha⁻¹, con un valor medio de 62 kg N ha⁻¹, mientras que los rendimientos de los cultivos variaron entre 5023 y 14383 kg ha⁻¹. El máximo rendimiento alcanzado en cada sitio (utilizado como un índice que representa su potencialidad de producción en otros estudios (Salvagiotti et al., 2011) varió entre 7695 y 14383 kg ha⁻¹. En 33 sitios se observaron respuestas significativas al agregado de N, con incrementos de entre un 9,1% a un 115%. Los 5 sitios donde no se observaron respuestas significativas presentaron contenidos de N variables (entre 56 y 94 kg N ha⁻¹) y todos presentaban poca cantidad de años con prácticas de agricultura continua (2-3 años después de pasturas perennes), lo que podría generar un aporte adicional por mineralización de la MO.

A partir de un ajuste lineal-meseta entre los RR y el Nd de los 38 sitios se observó que la mayor producción de grano se obtendría al superarse los 157 kg N ha⁻¹ (**Figura 1**). El análisis parcial separando entre sitios de bajo y alto potencial de rendimiento, en base a su rendimiento máximo, no permitió mejorar el ajuste, en contraposición a lo observado por Salvagiotti et al. (2011) que determinaron umbrales críticos de 137 y 161 kg ha⁻¹ de Nd para sitios con rendimientos inferiores

o superiores a los 9520 kg ha⁻¹, respectivamente. En nuestro estudio solo el 21% de los sitios presentaban rendimientos inferiores a los 9500 kg ha⁻¹. Estos resultados validan el propósito del estudio centrado en sitios de mayor aptitud y condiciones de producción agrícola en la región dados por suelos profundos y en fechas de siembra temprana.

Las eficiencias de uso de N fueron en promedio 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. Estos resultados validan que en las condiciones de este análisis los sitios analizados corresponden a una misma población (o condiciones de producción y características de respuestas al agregado de N) donde se describen incrementos en producción decrecientes con aumentos en la oferta del N aplicado.

Ensayos de Respuesta a P

Los rendimientos variaron entre 4515 y 14054 kg ha⁻¹, dependiendo de las condiciones de sitios y fundamentalmente de las precipitaciones ocurridas durante el ciclo de los cultivos (datos no

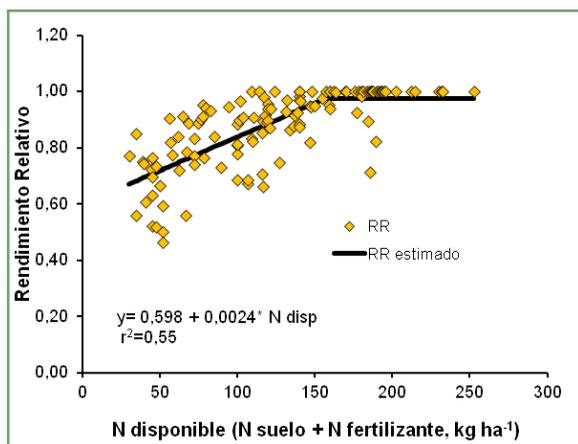


Figura 1. Relación entre el rendimiento relativo de maíz y el contenido de N disponible en el suelo más el fertilizante nitrogenado. Datos de 38 ensayos de fertilización en Hapludoles típicos y Hapludoles énticos de la Pampa Arenosa.

Tabla 1. Niveles de fósforo extractable (Pe, en mg kg⁻¹) y Respuesta al agregado de fósforo (Resp, en %) incorporado al momento de la siembra de los cultivos de maíz en 16 sitios de la pampa arenosa.

Sitio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Pe	9,9	11,3	12,7	9,9	9,8	16,9	12,6	22	12,6	13	13	14	10	16	14	13
Resp	54	17	9	12	10	14	43	5	30	4	22	20	8	-1	0	30

presentados). En 12 sitios se observó respuesta significativa al agregado de P (p<0,05) con incrementos de entre un 5% (sitio 8) y un 54% (sitio 1), (Tabla 1, Figura 2). La eficiencia de uso de P (EUP) de los sitios con respuesta fue en promedio de 80 kg grano kg P aplicado⁻¹ (mínimo de 23 y máximo de 138 kg grano kg P aplicado⁻¹). No se observó una relación significativa entre la respuesta y el nivel de Pe de los suelos a la siembra (Tabla 1). Considerando todos los sitios evaluados la respuesta en el rendimiento fue en promedio un 17% de aumento respecto de los testigos sin P.

Ensayos de Respuesta a S

Todos los sitios evaluados presentaron contenidos de S-sulfato bajos (por ejemplo: sitios 1, 2, 3, 4, 9 y 10 < 8 mg kg⁻¹ y sitios 5, 6, 7, 8 y 11 entre 9 y 12 mg kg⁻¹ en la capa de 0 a 20 cm y concentraciones similares o menores en las capas de 20 a 40 o 40 a 60 cm). Los rendimientos variaron entre 7658 y 14 054 kg ha⁻¹. Solo en un sitio (11) se observó respuesta significativa al agregado de S (p<0,05) y si bien en los sitios 1 y 6 los cultivos fertilizados rindieron en promedio un 9 y un 14% más que los testigos la información disponible no permitió establecer diferencias significativas (p=0,32 y p=0,27, respectivamente), (Figura 3). Considerando todos los sitios evaluados los cultivos fertilizados con S rindieron en promedio 3,6%

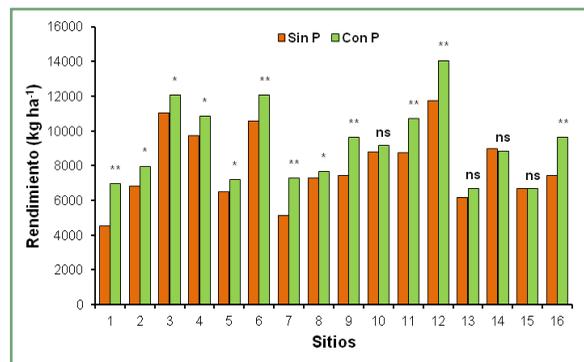


Figura 2. Rendimientos de maíz según tratamientos de fertilización con fósforo (P) en 16 sitios de la pampa arenosa. ns = sin diferencias, * diferencias con p<0,05, ** diferencias con p<0,01.

más que los no fertilizados. En la misma región Barraco y Díaz-Zorita (2009) en una red de 35 sitios de fertilización de S en trigo observaron que solo el 38% de los sitios presentaron respuestas al agregado de S con incrementos medios del 4,1% y que las variables de caracterización de los sitios (textura, MO, S-Sulfato, entre otros) resultaron insuficientes para detectar sitios con probabilidad de respuesta.

La escasa respuesta a S podría estar afectada (entre otros factores) al aporte de S por el agua freática. Zaniboni y Otero (común. personal) señalaron a partir de un análisis de 70 freáticos en el Oeste de la Provincia de Buenos Aires que las napas podrían aportar entre 25 y 200 kg S ha⁻¹ cada 100 mm de agua freática. Concentraciones muy variables de S en napa también fueron reportadas por Macchiavello (2014) en un análisis de 18 freáticos del Partido de General Villegas. Además, otros estudios atribuyen la falta de respuesta al agregado de S a posibles aportes de S por mineralización a partir de fracciones orgánicas del suelo.

CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio desarrollados en suelos de texturas arenosas a franco arenosas y con un amplio rango de fertilidad de los suelos en la RPA muestran una alta probabilidad de respuesta a la fertilización nitrogenada en maíz (87% sitios con respuesta), con incrementos medios en producción de un 23% por sobre el control sin fertilización. Los mayores rendimientos se observaron con contenidos de Nd (N suelo + N fertilizante) superiores a los 157 kg N ha⁻¹.

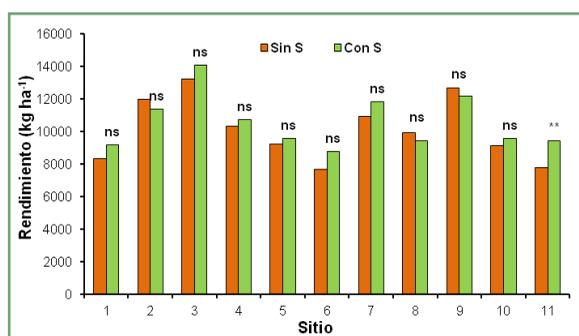


Figura 3. Rendimientos de maíz según tratamientos de fertilización con azufre (S) en 11 sitios de la pampa arenosa. ns=sin diferencias, * diferencias con $p < 0,05$, ** diferencias con $p < 0,01$.

El agregado de P incrementó los rendimientos en el 75% de los ensayos evaluados, con una eficiencia promedio de 80 kg grano kg P aplicado⁻¹ y en promedio los cultivos fertilizados rindieron un 17% más que los controles sin fertilización.

La probabilidad de respuesta a S es menor (sólo fue significativa en el 10% de los sitios evaluados) y en promedio los tratamientos con S rindieron 3,6% más que los controles sin fertilización.

AGRADECIMIENTOS

A los Ings. Agrs. A. Lardone y C. Scianca por la colaboración en el seguimiento de los ensayos.

BIBLIOGRAFÍA

- Barraco, M., y M. Díaz-Zorita.** 2005. Momento de fertilización nitrogenada de cultivos de maíz en Hapludoles Típicos. *Revista Ciencia del Suelo* 23(2): 197-203.
- Barraco, M., y M. Díaz-Zorita.** 2006. Fertilización postergada de nitrógeno en maíz en la región de la Pampa Arenosa. *Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. I Reunión de suelos de la región Andina. 19 al 22 de setiembre de 2006. Salta- Jujuy. Argentina.*
- Barraco, M., M. Díaz Zorita, C. Brambilla, C. Álvarez, y C. Scianca.** 2009. Respuesta del trigo a la fertilización nitrogenada y nitroazufra en suelos arenosos. *Revista Ciencia del Suelo. 27(2): 217-224.*
- Barraco, M., A. Lardone, y C. Scianca.** 2013. Fertilización con azufre en la secuencia trigo/soja de segunda. En: INTA. EEA General Villegas. *Memoria Técnica 2012-2013. General Villegas: Ediciones INTA, pp. 48-51.*
- Bono, A; D.E. Buschiazzo; P. Lezcano; J. Montoya, y F. Babinec.** 1997. Fertilización de una pastura con nitrógeno, fósforo y azufre en un Haplustol éntico de La Pampa (Argentina). *Ciencia del Suelo* 15: 95-98.
- García, F.O., L.I. Picone, y A. Berardo.** 2007. Fósforo. En: Echeverría, H.E; García, F.O. (Eds). *Fertilidad de Suelos y fertilización de Cultivos. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. pp: 99-121.*
- Gentilini, A., y F. Gutierrez Boem.** 2004. Fertilización azufrada del cultivo de soja en el centro-sur de Santa Fe. *Informaciones Agronómicas* 24:12-14. INPOFOS Cono Sur. Acaassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Macchiavello, A.** 2014. Comportamiento de napas y calidad de agua en el Partido de General Villegas. En: INTA. EEA General Villegas. *Memoria Técnica 2011-2012. General Villegas: Ediciones INTA, pp 77-79.*
- Méndez, D., P. Davies, C.A. Gonella, y M. Díaz-Zorita.** 1998. Fertilización de verdes de invierno. Respuesta animal. *Rev. Arg. Prod. Animal* 18:96-97.
- Reussi Calvo, N.I., H.E. Echeverría, y H. Sainz Rosas.** 2006. Respuesta del cultivo de trigo al agregado de azufre en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 24: 77-87.
- Sainz Rosas, H., H.E. Echeverría, y H. Angelini,** 2012. Fósforo disponible en suelos agrícolas de la Región Pampeana y Extrapampeana argentina. *RIA Volumen 38- N°1. pp 33-39.*
- Zaniboni, C.M.** 2012. Uso del suelo en el territorio agrícola ganadero del oeste bonaerense. En: INTA. EEA General Villegas. *Memoria Técnica 2011-2012. General Villegas: Ediciones INTA, pp 200-206.*

[volver al índice](#)

Fertilización nitrogenada y azufrada de cebada cervecera en el norte de la provincia de Buenos Aires

J. Boero^{1,2,3}, F. Gomez¹, S. Urricarriet¹, P. Prystupa^{1,2}, G. Ferraris⁴, G. Rubio^{1,2} y F. Gutiérrez Boem^{1,2}

¹Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, UBA.; ²INBA, CONICET-UBA

³Universidad Nacional de Lujan; ⁴INTA EEA Pergamino

*Contacto: josejboero@yahoo.com.ar

INTRODUCCIÓN

El cultivo de cebada viene aumentando en superficie, rendimiento y producción desde hace más de una década. A partir del año 2010 se han producido entre 3 y 5 millones de toneladas por año consolidándose como un importante cultivo de invierno. Este crecimiento fue posible debido a la disponibilidad de materiales genéticos con potenciales de rendimiento comparables con los del trigo en un contexto en que el trigo tuvo restricciones a las exportaciones y mayores retenciones que la cebada.

Aunque todas las variedades cultivadas en nuestro país son cerveceras, el cereal obtenido puede ser destinado tanto a la industria maltera (cebada cervecera) o como a la alimentación animal (cebada forrajera). El estándar de comercialización de la cebada forrajera es bastante simple: además de los requisitos de humedad y granos dañados, se requiere que el peso hectolítrico sea mayor a 56 kg hl⁻¹. En cambio, los requisitos de calidad de la cebada cervecera son mayores: debe tener pureza varietal, el poder germinativo debe ser alto (mayor a 95%), el calibre (una estimación del tamaño de los granos realizado con una zaranda) debe ser alto (mayor al 85%) y el contenido proteico no debe ser mayor al 12%.

Como los cultivares modernos presentan mayor eficiencia de uso del nitrógeno (N) para producir grano, tienden a presentar un contenido proteico menor que los cultivares más antiguos (Abeledo et al., 2008). Es importante destacar que el contenido proteico no debe ser bajo (inferior a 10%): se pagan bonificaciones por las partidas de cebada con valores intermedios de proteínas (la máxima bonificación se obtiene con granos que poseen entre 11 y 12%) (Savín y Aguinaga, 2011). Por lo tanto, el objetivo de producción en cebada cervecera no es sólo obtener altos rendimientos sino alcanzar una adecuada calidad comercial.

El manejo de la fertilización nitrogenada es fundamental para alcanzar altos rendimientos y adecuada calidad industrial. Las investigaciones

realizadas en la región pampeana han permitido establecer que las variedades actualmente cultivadas de cebada pueden tener una alta respuesta a la fertilización nitrogenada tanto en términos de rendimiento como de contenido proteico (Dave-rede et al., 2013; Ferraris et al., 2014; Prystupa et al., 2012; Ross et al., 2011; Ross et al., 2013).

El contenido proteico de los granos está asociado positivamente con la disponibilidad de N (definida como la suma del N presente como nitratos hasta 60 cm de profundidad y el N presente en los fertilizantes) y negativamente con el rendimiento (Prystupa, et al. 2012). Una alternativa para aumentar el contenido de proteínas de los granos consiste en complementar las fertilizaciones nitrogenadas realizadas entre siembra y macollaje, con aplicaciones foliares durante espigazón. En nuestro país, se ha observado que las aplicaciones durante esta etapa suelen producir aumentos del contenido proteico sin efectos sobre el rendimiento (Dave-rede et al., 2013; Prystupa et al., 2012; Ross et al., 2011). Dado que en espigazón el cultivo ya completó una buena parte de su ciclo, sería más fácil estimar los requerimientos de N para alcanzar un adecuado contenido proteico de los granos que en fertilizaciones más tempranas.

En la región pampeana se han observado respuesta a la fertilización azufrada en diversos cultivos. En experiencias realizadas en cebada se han observado efectos por agregado de este nutriente (Michiels y Degenhart. 2004), mientras que otros investigadores no encontraron efecto (Ross et al., 2011).

En la campaña pasada, hemos iniciado un plan de investigación que tiene por objeto evaluar el efecto de la fertilización nitrogenada en emergencia y en espigazón y de la fertilización con azufre (S) en emergencia sobre el rendimiento y la calidad comercial en cultivos de cebada cervecera en el norte de la Provincia de Buenos Aires. En este artículo se presentan los resultados obtenidos en el primer año, planeamos continuar con este plan durante dos años más.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el año 2014 se realizaron 13 experimentos en el área de cultivo de cebada del norte de la Provincia de Buenos Aires. Los mismos se realizaron sobre cultivos destinados a producción. Las variedades, las prácticas de manejo y la fertilización fueron las empleadas por los productores. Por lo tanto, las dosis de fertilización correspondientes a cada tratamiento se adicionaron a las fertilizaciones realizadas por los productores. Algunos datos de los sitios se muestran en la **Tabla 1**. El diseño experimental fue en bloques completos aleatorizados con dos repeticiones. Las parcelas tuvieron 4 m de ancho por 16m de longitud. Los tratamientos evaluados fueron los siguientes:

- 1- Testigo: sin fertilización adicional a la realizada por el productor a la siembra
- 2- N espigazón: 20 kg N ha⁻¹ foliar de N (urea líquida) en floración (aparición de aristas).
- 3- N emergencia: 150 kg N ha⁻¹ en 2 hojas-macollaje (sin limitación de N).
- 4- S emergencia: 15 kg S ha⁻¹ en 2 hojas-macollaje (sin limitación de S).

La cosecha se realizó en forma manual y se trilló en trilladora estacionaria. Sobre las muestras obtenidas se determinó el calibre y el contenido proteico del grano. El calibre se determinó empleando un sistema de zarandas calibradas Sortimat que permite clasificar los granos en cuatro clases de acuerdo a su ancho: mayor a 2.8 mm (primera), entre 2.8 y 2.5 mm (segunda), entre 2.5 y 2.2 mm (tercera) y menor a 2.2 mm (cuarta). Las "Normas de calidad y comercialización de cebada" vigentes

en la Argentina tienen en cuenta el calibre (suma de la primera y segunda fracción expresado como porcentaje de la masa total) para determinar la calidad comercial del grano. El contenido proteico se determinó mediante el método de Kjeldhal. A partir del rendimiento y el contenido de N de los granos (que se calculó mediante el cociente entre el contenido proteico y el factor 6.25) se calculó el N en grano por unidad de superficie.

Los resultados fueron analizados mediante análisis de varianza considerando el sitio como un factor. Cuando el efecto de los tratamientos fue significativo, se compararon el testigo con el tratamientos 2, 3 y 4 mediante contrastes.

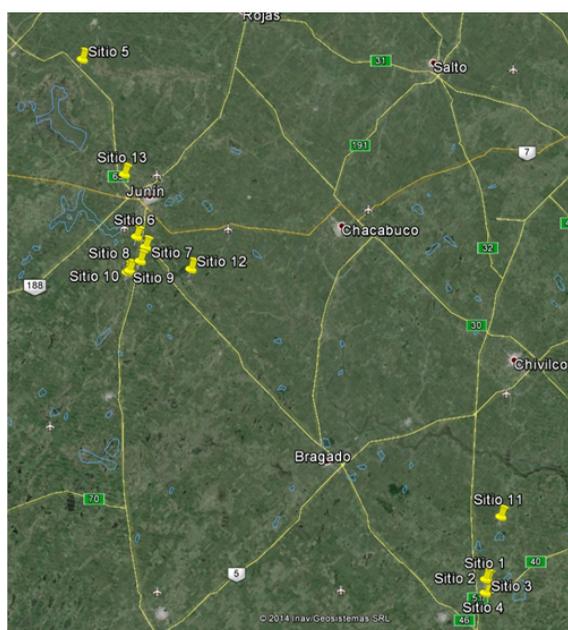


Figura 1. Ubicación geográfica de los sitios experimentales.

Tabla 1. Datos de los sitios de la red de ensayos.

Sitio	Localidad	Cultivar	Fecha Siembra	Antecesor
1	25 de Mayo	Shakira	08-Jun	soja
2	25 de Mayo	Shakira	10-Jun	trigo/soja
3	25 de Mayo	Shakira	17-Jun	cebada/soja
4	25 de Mayo	Shakira	17-Jun	girasol
5	Fortin Tiburcio	Andreia	10-Jun	cebada/soja
6	Baigorrita	Andreia	03-Jul	trigo/soja
7	Baigorrita	Scarlett	14-Jul	soja
8	Baigorrita	Andreia	07-Jul	Soja
9	Baigorrita	Scarlett	10-Jul	cebada/soja
10	Baigorrita	Scarlett	08-Jul	cebada/soja
11	Gdor Ugarte	Jeniffer	24-Jun	Soja
12	Morse	Shakira	20-Jun	Soja
13	Junin	Shakira	02-Jul	Soja

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Algunas características químicas del suelo y la disponibilidad de agua en emergencia de los cultivos se muestran en la **Tabla 2**.

Fertilización nitrogenada a la siembra

Los rendimientos variaron entre 2200 y 8200 kg/ha reflejando la gran diversidad de ambientes explorados por los cultivos (**Figura 2**). El efecto de los tratamientos varió entre los distintos ensayos (**Tabla 3**). La fertilización nitrogenada en emergencia incrementó significativamente el rendimiento de los cultivos en 6 de los 13 experimentos (exps. 1, 4, 6, 8, 9 y 11) y tendió a incrementarlos en el resto.

La respuesta a la fertilización en emergencia se relacionó significativamente con el máximo rendimiento logrado (rendimiento del fertilizado) para cada sitio (**Figura 3**). Por lo tanto, el mayor efecto del N sobre el rendimiento se observa en los sitios que presentan los mayores potenciales de rendimiento.

Tabla 2. Caracterización de los suelos al inicio de los ensayos.

Sitio	MO	P Bray	pH	N-NO ₃	Agua
	0-20 cm (%)	0-20 cm (ppm)	0-20 cm	0-60 cm (kg ha ⁻¹)	0-100 cm (mm)
1	1.70	18.8	5.59	29.2	197
2	1.50	11.3	5.41	59.0	198
3	1.70	7.0	5.64	46.6	178
4	1.84	6.2	6	40.3	197
5	2.21	6.7	5.72	59.1	267
6	2.37	10.4	5.75	43.7	269
7	2.61	12.1	5.78	45.5	248
8	2.83	16.5	5.99	30.5	357
9	2.60	3.7	5.96	44.1	357
10	2.75	7.3	5.94	53.3	286
11	2.54	18.3	5.49	21.1	208
12	2.16	4.1	5.91	24.8	241
13	2.77	9.8	5.75	33.9	187

Tabla 3. Análisis de varianza (ANVA) de los factores evaluados. Cuando los efectos simples de los tratamientos fueron significativos y la interacción no significativa se presentan las comparaciones entre el testigo y cada uno de los tratamientos fertilizados evaluadas mediante contrastes. El número indica la probabilidad cuando $p < 0.05$ y NS indica que $p > 0.05$.

Factor	Rendimiento	Calibre	Proteínas	N en grano
	valor de p			
Sitio	0.001	0.001	0.001	0.001
Tratamiento	0.001	0.001	0.001	0.001
Sitio x Tratamiento	0.003	0.001	N.S.	N.S.
Contrastes para efecto simple de tratamiento				
Test vs Nf120			0.012	0.007
Test vs N150			0.001	0.001
Test vs S20			N.S.	N.S.

Los calibres fueron, en general, muy bajos. Sólo en 5 sitios superaron el 85% establecido como mínimo en las normas de comercialización (**Figura 4**). El efecto de los tratamientos varió entre sitios

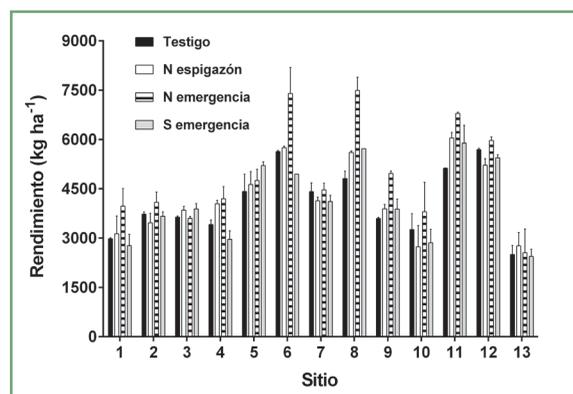


Figura 2. Rendimiento de cebada sujeto a distintos tratamientos de fertilización nitrogenada y azufrada en 13 sitios experimentales. La línea sobre la barra indica el error estándar.

(interacción tratamientos x sitio significativa) (Tabla 3). En 8 experimentos el calibre disminuyó significativamente por efecto de la fertilización nitrogenada inicial, mientras que en los restantes sitios se observaron tendencias en el mismo sentido.

El efecto de los tratamientos sobre el contenido proteico de los granos y sobre el N en grano (por unidad de superficie) fue significativo pero no varió entre sitios (interacción tratamiento x sitio no significativa) (Tabla 3). La fertilización nitrogenada inicial incrementó el contenido proteico de los granos y N en grano (por unidad de superficie) (Figura 5). En promedio, por cada kilogramo de N aplicado en el fertilizante, el contenido proteico de los granos aumentó el 0.022%.

El contenido proteico se relacionó significativa-

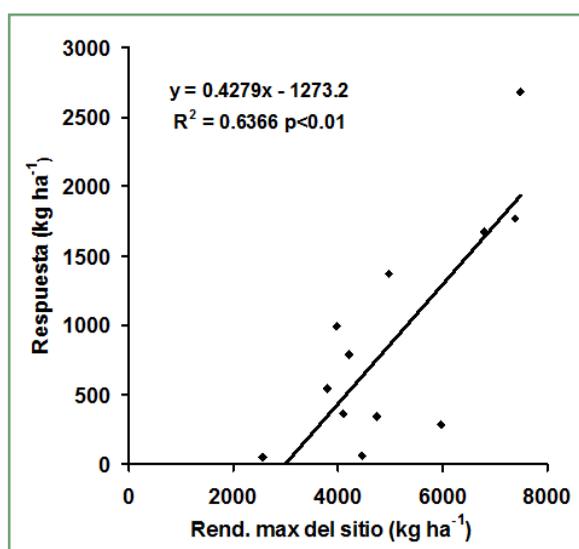


Figura 3. Respuesta de rendimiento en grano de cebada cervecera a la fertilización nitrogenada a la siembra en relación al máximo rendimiento de cada sitio.

mente a la disponibilidad de N por tonelada de rendimiento producido (Figura 6). Para obtener un contenido proteico entre 10% y 11% es necesario disponer entre 20.2 y 30 kg N Tn grano⁻¹.

Fertilización nitrogenada en espigazón

La fertilización nitrogenada en espigazón incrementó significativamente los rendimientos solamente en dos sitios (sitios 8 y 11; Figura 2). En el resto de los sitios no se observó una tendencia clara. De manera similar, esta fertilización incrementó significativamente el calibre en un solo experimento (sitio 1; Figura 4).

El principal efecto de la fertilización en espigazón fue aumentar el contenido proteico de los granos: la aplicación de 20 kg N ha⁻¹ produjo un incremento promedio de 1.2%. Es decir que por cada kilogramo de N aplicado en este momento el contenido proteico de los granos aumentó 0.038%.

Fertilización azufrada a la siembra

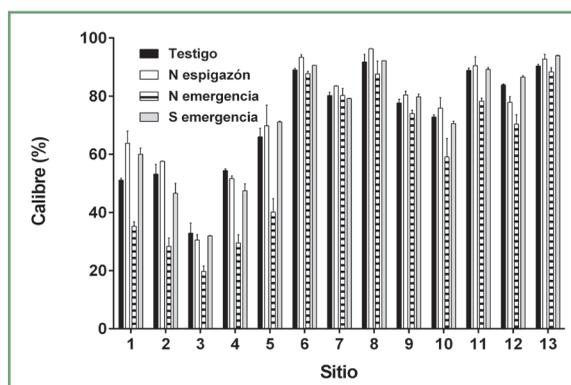


Figura 4. Calibre de cebada sujeto a distintos tratamientos de fertilización nitrogenada y azufrada en 13 sitios experimentales. La línea sobre la barra indica el error estándar.

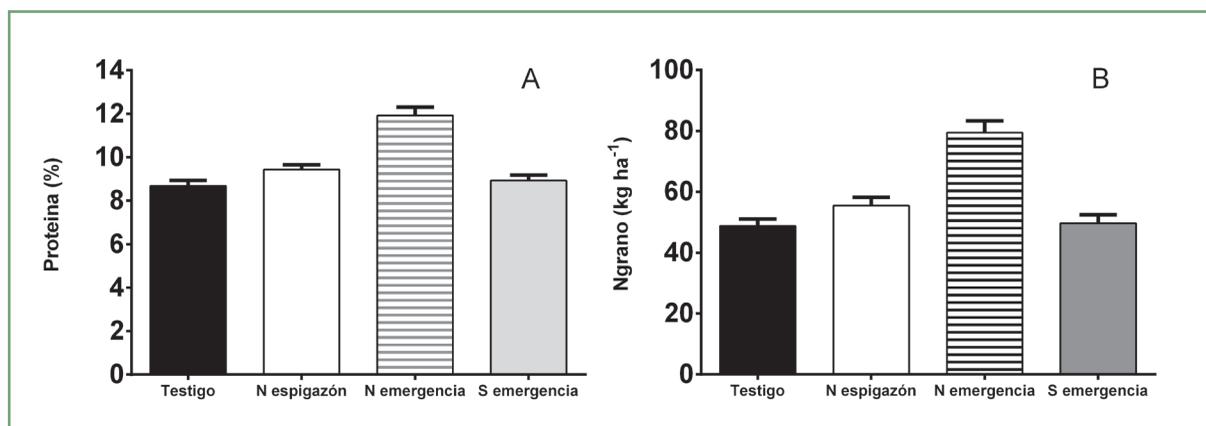


Figura 5. Contenido proteico de los granos (A) y N en los granos (kg ha⁻¹) en cultivos de cebada sujetos a distintos tratamientos de fertilización nitrogenada y azufrada. Cada barra representa el promedio de 13 sitios experimentales. La línea sobre la barra indica el error estándar.

La fertilización azufrada incrementó significativamente el rendimiento en dos experimentos: produjo un aumento de 790 kg N ha⁻¹ en el exp. 5 y de 770 kg N ha⁻¹ en el exp. 11 (Tabla 3). En el resto de los experimentos no se observó una tendencia clara.

Los efectos sobre el calibre fueron contradictorios: la fertilización azufrada determinó un incremento significativo de 8.9% en el exp. 1 y disminuciones significativas de 6.6% y 6.9% en los exps. 2 y 4, respectivamente.

La fertilización azufrada no afectó el contenido proteico de los granos ni el N acumulado en grano por hectárea.

CONCLUSIONES

Si bien en estos experimentos resta evaluar distintas características del cultivo que pueden servir para diagnosticar la respuesta a la fertilización, la información obtenida permite llegar a las primeras conclusiones:

- En los cultivos de cebada evaluados, la fertilización nitrogenada en emergencia tuvo un fuerte impacto sobre los rendimientos y el contenido proteico de los granos. Esta respuesta estuvo relacionada al potencial de cada sitio (evaluada a través del máximo rendimiento alcanzado).
- Considerando que todos los tratamientos tenían como fertilización de base la realizada por los productores, estos resultados indican que el nivel de fertilización nitrogenada utilizada en los sistemas productivos (al menos en los cultivos de cebada de la zona y del año evaluados) es totalmente insuficiente.
- La fertilización nitrogenada en emergencia incrementó tanto el rendimiento como el contenido proteico de los granos mientras que la realizada

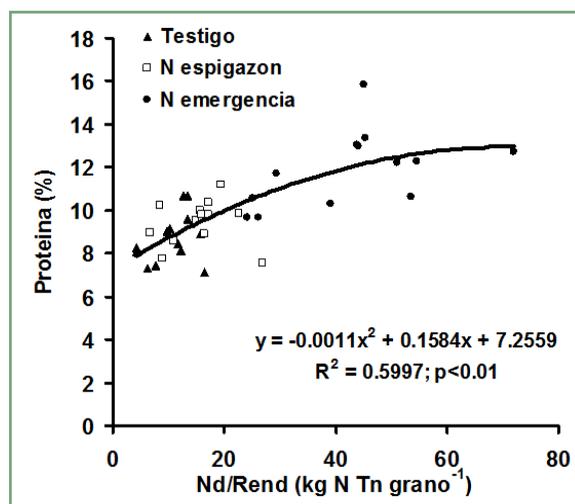


Figura 6. Contenido proteico en grano de cebada cervecera en función de la disponibilidad de N por tonelada de rendimiento.

en espigazón incrementó, en la mayoría de los casos, solamente el contenido proteico. Por kilogramo de N aplicado, la fertilización en espigazón (respecto de la realizada en emergencia) produjo un mayor incremento en el contenido proteico de los granos y en el N acumulado en los granos por hectárea. Pero debe advertirse que la dosis aplicada en emergencia fue muy alta, por lo que es esperable que la eficiencia en el uso del N disminuya.

- Las deficiencias azufradas en cebada cervecera no parecen ser generalizadas en la región. Pero en algunos casos puntuales producen incrementos en los rendimientos que pueden determinar interesantes márgenes de ganancias para esta fertilización.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración de las siguientes personas que han hecho posible esta red: Nicolás y Tati Casella de Italsem S.A., Gustavo Franco; Hernán Rivero y Gustavo Herrá de ASP S.A., Alejandro Alegre y Esteban Marré de El Mayoral S.R.L., Sebastian Arias y Carlos Gutiérrez.

BIBLIOGRAFÍA

- Abeledo, L.G., D.F. Calderini, y G.A. Slafer.** 2008. Nitrogen economy in old and modern malting barleys. *Field Crops Res.* 106(2), 171-178.
- Daverede, I., F. Miguez, R. Frigerio, y J. Scanlan.** 2013. Respuesta de la cebada cervecera (*Hordeum vulgare* L.) a la fertilización y aplicación de fungicida. IV Congreso Latinoamericano de Cebada. Bahía Blanca. Actas en CD.
- Michiels, C., y S. Degenhart.** 2004. Ensayo de fertilización de cebada cervecera, var. Scarlett. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 22:18-20.
- Prystupa, P., G. Ferraris, T. Loewy, F.H. Gutierrez Boem, L. Ventimiglia, L. Couretot, y R. Bergh.** 2012. Fertilización nitrogenada de cebada cervecera cv. Scarlett en la provincia de Buenos Aires. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 16-20 abril, Mar del Plata.
- Ferraris, G.N., F. Mousegne, M. Barraco, J. Cavo, L. Couretot, R. Falconi, E. Lemos, M. López de Sabando, G. Magnone, A. Martín, P. Melilli, O. Ferraris, A. Paganini, G. Pérez, R. Pontoni, J. Zanettini, C. Scianca, R. Solá, M.G. Tellería, y L. Ventimiglia.** 2014. Rendimiento y respuesta comparada a fósforo y nitrógeno en trigo y cebada cervecera (2009, 2010, 2011, 2012 y 2013). XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca. Actas en Pen Drive.
- Ross F., J. Massigoge, y M. Zamora.** 2011. Fertilización de cebada cervecera en ambientes con tosca en el sur de Buenos Aires, Argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 3: 9-13.
- Savin, R., y A. Aguinaga.** 2011. Los requerimientos de la industria: calidad comercial e industrial y sus determinantes. En: D.J. Miralles, R.L. Benech Arnold y L.G. Abeledo (Eds.). *Cebada cervecera*. Pp. 207-238. Editorial Facultad de Agronomía. Buenos Aires, Argentina.

[volver al índice](#)

¿Qué sabemos del diagnóstico de azufre en los cultivos de la región pampeana argentina?

W.D. Carciochi^{1,4}, G.A. Divito^{2,4}, N.I. Reussi Calvo^{3,4} y H.E. Echeverría⁴

¹ Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica; ² CONICET; ³ Laboratorio de suelos FERTILAB; ⁴ Unidad Integrada Balcarce (Fac. Ciencias Agrarias-UNMdP - EEA INTA Balcarce).

*Contacto: waltercarciochi@hotmail.com; Ruta 226 km 73,5. Balcarce (BA); 02266-439100.

INTRODUCCIÓN

El azufre (S) es un elemento esencial para el crecimiento vegetal. Durante años, el estudio de este nutriente recibió poca atención dado que su disponibilidad en el suelo y los aportes atmosféricos y/o en los agroquímicos permitían cubrir la demanda de los cultivos. Sin embargo, en la actualidad, parte de la superficie cultivada a nivel mundial, incluida la Región Pampeana, presenta deficiencia de S (Echeverría et al., 2015). Para esta última región, la intensificación de la actividad agrícola y la adopción del sistema de siembra directa, fueron las principales causas de la actual deficiencia de S en los cultivos. Es así como se han reportado numerosos casos donde la aplicación de fertilizantes azufrados produjo aumentos en el rendimiento de soja (Gutierrez Boem et al., 2006; Divito et al., 2014), trigo (Salvagiotti y Miralles, 2008; Reussi Calvo et al., 2011) y maíz (Ferraris et al., 2006; Pagani et al., 2009).

En este escenario, la deficiencia de S mal diagnosticada tiene como consecuencia directa la reducción del rendimiento del cultivo y/o de la calidad de los granos. Por el contrario, la aplicación sistemática de fertilizantes representa una estrategia poco racional en términos económicos y ambientales. Por ello, es necesario contar con índices de disponibilidad de S que sean, precisos, simples y de bajo costo.

Se plantean como objetivos del presente trabajo: i) realizar un análisis comprensivo de las herramientas disponibles para el diagnóstico del estatus azufrado en soja, trigo y maíz, ii) proponer un árbol de decisión para la fertilización azufrada, y iii) identificar áreas de vacancia de información en la temática.

HERRAMIENTAS PARA EL DIAGNÓSTICO DEL ESTATUS AZUFRADO

1. Características del suelo y sistema de producción

Existen ciertas condiciones ambientales y de

manejo de un sitio que incrementan la probabilidad de ocurrencia de la deficiencia de S. De este modo, suelos de textura gruesa, con bajo contenido de materia orgánica (MO), bajo siembra directa, con prolongada historia agrícola, ausencia de barbechos, ambientes de alta productividad y/o sin aporte sub-superficial de agua rica en sulfato, han sido identificados como escenarios de probable respuesta al agregado de S. Así, el conocimiento de esta información brinda una primera aproximación sobre la probabilidad de que los cultivos manifiesten deficiencia de S.

2. Cuantificación de la disponibilidad de S-sulfato en el suelo

La determinación de la cantidad de S-sulfato en el suelo a la siembra de los cultivos tiene como ventajas el conocimiento generalizado que existe sobre la forma de tomar las muestras y el beneficio de aprovechar la infraestructura y el equipamiento que disponen los laboratorios para la determinación de otros nutrientes. Sin embargo, ésta determinación ha mostrado un escaso valor predictivo de la probabilidad de respuesta a la fertilización con S en la Región Pampeana (Pagani y Echeverría, 2011; Steinbach y Álvarez, 2012; Divito y Echeverría, 2014); siendo una de las causas la baja precisión de la cuantificación turbidimétrica (Russi et al., 2010; PROINSA, 2013).

Por otra parte, el aporte de sulfato de horizontes sub-superficiales (Echeverría et al., 2015), desde el agua de napa y el procedente de la mineralización del S orgánico durante el ciclo del cultivo también contribuyen a explicar la escasa performance que tiene el método. Pese a ello, resulta importante considerarlo como herramienta de diagnóstico, aunque requiere ser complementado con información agronómica, de manejo y/o con análisis de material vegetal.

3. Análisis de material vegetal

Los análisis de planta presentan la ventaja respecto a las determinaciones en muestras de suelo de que integran los efectos del suelo, clima

y propios del cultivo, que afectan su estatus azufrado. Una de las determinaciones utilizadas es la concentración de S total en la biomasa aérea o en una parte específica de la planta. En general, la concentración de S depende de la parte de la planta analizada, del estadio de desarrollo y de la disponibilidad de otros nutrientes (Hahtonen y Saarela, 1995), lo que dificulta la definición de una única concentración crítica de S (concentración mínima requerida para lograr la máxima tasa de crecimiento y, por ende, la máxima producción de biomasa del cultivo). Para evitar esto, se ha propuesto la determinación de la relación nitrógeno:azufre (N:S), que es más estable durante el ciclo de crecimiento de los cultivos (Reussi Calvo et al., 2012). Si bien esta metodología es más precisa y ha permitido diagnosticar correctamente deficiencias de S en los distintos cultivos, presenta la desventaja de ser más costosa, en comparación con la determinación de sulfato en suelo. Para el análisis de granos, el método utilizado se basa en el empleo conjunto de la concentración de S y de la relación N:S en los mismos. Aunque éste no permite corregir deficiencias de S, resulta de utilidad como guía para la fertilización de otros cultivos en la rotación.

Una alternativa al análisis de nutrientes en material vegetal lo constituyen el empleo de medidores de la transmitancia foliar. Los mismos presentan ventajas al permitir un diagnóstico instantáneo, de bajo costo, no destructivo y cuantitativo del contenido de clorofila de las hojas. Uno de los instrumentos más empleados es el Minolta SPAD 502, el cual expresa un valor cuantitativo de la intensidad de color verde de la hoja denominado índice de verdor (IV). Dado que el síntoma más común de deficiencia de S es la disminución en la intensidad del color verde, debido a una menor concentración de clorofila, es posible utilizar dicho instrumento para caracterizar el estatus azufrado de los cultivos. Para ello, es necesario relativizar el valor de IV del lote a evaluar con el correspondiente a una franja o parcela fertilizada con S, obteniendo así un índice de suficiencia de azufre (ISS). El empleo de una franja sin limitaciones de S, también puede utilizarse para diagnosticar una deficiencia del nutriente, al comparar el rendimiento en grano del cultivo en la misma con el del resto del lote. Este caso, al igual que el análisis en grano, resulta de utilidad como guía para la fertilización de otros cultivos en la rotación.

En síntesis, en la actualidad se dispone de diferentes herramientas que permiten diagnosticar la

disponibilidad de S, y que han sido evaluadas en los principales cultivos de la Región Pampeana.

EXPERIENCIAS POR CULTIVO

• Soja

Debido a que la soja es el principal cultivo de la Región Pampeana y a que tiene un alto requerimiento de S (7 kg S t⁻¹ grano), se han realizado numerosas experiencias para evaluar la respuesta al agregado de este nutriente y la performance de las metodologías de diagnóstico. En soja de primera, se determinó que el 31% de 88 ensayos manifestaron aumento de rendimiento por el agregado de S (Ferraris, 2005; Gutiérrez Boem et al., 2006; Salvagiotti et al., 2012; Divito y Echeverría, 2014), siendo el mismo de 408 kg ha⁻¹ (11%). Por su parte, el cultivo de soja de segunda tiene mayor probabilidad de sufrir deficiencia de S debido a la extracción del nutriente del cultivo antecesor. Por este motivo, se determinaron incrementos promedio de 405 kg ha⁻¹ (16%) en el 44% de los 18 ensayos (Echeverría et al., 2011; Divito y Echeverría, 2014). Cabe aclarar que muchos de estos ensayos fueron realizados en sitios donde las condiciones ambientales y de manejo indicaban alta probabilidad de respuesta a la aplicación de S.

Indicadores de Suelo

En el cultivo de soja de primera, la disponibilidad de sulfato (S-sulfato) en el suelo (0-60 cm) no ha permitido predecir la respuesta a la aplicación de S (Divito y Echeverría, 2014), o se han encontrado relaciones muy débiles ($R^2=0.27$) entre dichas variables (Ferraris, 2005). Sin embargo, adicionando al contenido de S-sulfato la relación materia orgánica/arcilla (MO/As) la predicción de la respuesta a S fue de 84% (Ferraris, 2005). Si bien estos resultados requieren ser validados, refuerzan la importancia de considerar las características del suelo para el diagnóstico. De manera similar, el rendimiento relativo (RR) de la soja de segunda tampoco se asoció aceptablemente con el contenido de S-sulfato en los primeros 60 cm del suelo (Echeverría et al., 2011). A pesar de ello, dichos autores propusieron un umbral de 40 kg S ha⁻¹. Es importante destacar que la mayoría de los tratamientos mal diagnosticados correspondieron a situaciones con bajo nivel de S-sulfato y ausencia de respuesta en rendimiento, lo cual se debería al déficit hídrico sufrido durante el ciclo (**Figura 1**). Asimismo, el umbral mencionado coincide con el reportado para la Región Pampeana Núcleo

por Thomas et al. (2002) y permiten considerar al S-sulfato en suelo como aceptable método de diagnóstico.

Indicadores de Planta

Trabajos recientes indican una buena performance de las metodologías de análisis de hojas del estrato superior, biomasa aérea total (ambos muestreados entre R1 y R3, Fehr y Caviness, 1974) y grano (Divito, inédito). Para dichos órganos fue posible definir umbrales críticos de 2.2, 1.9 y 3.3 g S kg⁻¹, respectivamente. Asimismo, el diagnóstico fue más preciso mediante el empleo de la relación N:S, para la cual se definieron valores críticos de 15:1, para hojas y biomasa aérea total y de 16:1 para grano (Divito, inédito). Por su parte, Salvaggiotti et al. (2012) propusieron el uso combinado de la concentración de S y de la relación N:S en grano, siendo los umbrales 2.65 g S kg⁻¹ y 22:1, respectivamente (**Figura 2**). De esta forma pudieron diagnosticar correctamente el 100% y el 55% de los sitios sin y con deficiencia de S, respectivamente. Si bien con dichos umbrales se pudo tener un buen desempeño del método, los mismos difieren de los citados generalmente por la bibliografía, por lo que es más deseable utilizar los umbrales de 3.3 g S kg⁻¹ y 16:1 para la concentración de S y la relación N:S en grano, respectivamente.

Respecto al uso de índices ópticos, los resultados obtenidos con el ISS son auspiciosos, dado que lograron predecir la respuesta en rendimiento en ensayos de soja de primera (Divito et al., 2014) y soja de segunda (Divito y Echeverría, 2014). Sin embargo, cabe aclarar que el mejor desempeño de dicha metodología se observó en situaciones de severas deficiencias, como las ocurridas en la soja de segunda.

• Trigo

A pesar del bajo requerimiento de S del cultivo (4.5 kg S t⁻¹ grano), en los últimos años se ha observado respuesta positiva a la fertilización con este nutriente en la Región Pampeana. La respuesta media fue de 245 kg grano ha⁻¹, según información generada entre 1995-2009 (Steinbach y Álvarez, 2012). Por su parte, en una red más reciente de 30 ensayos en dicha región, se determinó un 17% de sitios con respuesta, siendo el aumento medio del rendimiento del 12% (Echeverría et al., 2011).

Indicadores de Suelo

Al intentar predecir la respuesta a la fertilización

con S en función del contenido de sulfato en el suelo en presembrado, algunos autores no encontraron relación entre ambas variables (Steinbach y Alvarez, 2012; García et al., 2010). Sin embargo, en experiencias desarrolladas en el Sudeste Bonaerense se han determinado aceptables relaciones entre dicha variable y el RR del cultivo (Reussi Calvo et al., 2006). En la misma línea, considerando un RR del 90% y un umbral de 36 kg S ha⁻¹ (Beaton y Soper, 1986), el RR del trigo se asoció con la disponibilidad de S (Echeverría et al., 2011), diagnosticando correctamente el 80% de los casos (**Figura 3**). Cabe aclarar que, de manera similar a lo discutido para soja, muchos de los sitios mal diagnosticados correspondieron a situaciones de bajo nivel de sulfato donde no se observó respuesta en rendimiento. Esto podría deberse en parte a deficiencias hídricas y por ende baja demanda de S por el cultivo, y también al aporte de sulfato sub-superficial, por agua de napa o el proveniente de la mineralización.

Así, los resultados permiten considerar al sulfato en suelo (0-60 cm) como elemento de diagnóstico inicial; y según éste la probabilidad de respuesta a la fertilización aumenta cuando la disponibilidad es inferior a 36 kg S ha⁻¹.

Indicadores de Planta

La determinación de la relación N:S total en biomasa aérea y en grano son los indicadores que con mayor frecuencia se utilizan para el diagnóstico de deficiencias de S. El empleo de la relación N:S crítica en biomasa aérea de 16:1, desde inicio de macollaje hasta fin de encañazón (**Figura 4**), permitió diagnosticar correctamente entre 90 y 100 % de las muestras de cultivos de trigo del Sudeste Bonaerense (Reussi Calvo et al., 2011). Utilizando dicho umbral se logró diagnosticar correctamente el 95% de las muestras provenientes de ensayos de varias zonas de la Región Pampeana (Echeverría et al., 2011).

Para el análisis de grano de trigo se propone el uso conjunto de la concentración de S total y de la relación N:S de los mismos, como un índice de la disponibilidad de S que tuvo el cultivo. Granos provenientes de cultivos que manifestaron respuesta a S son aquellos con una concentración menor a 1.5 g S kg⁻¹ y con una relación N:S mayor a 13:1 (Reussi Calvo et al., 2011). De esta forma, Reussi Calvo et al. (2011) pudieron diagnosticar correctamente el 77% de las muestras (**Figura 5**); mientras que Echeverría et al. (2011) obtuvieron un 98% de los sitios diagnosticados correctamen-

te, lo cual reafirma la robustez de dicho método de diagnóstico y umbrales.

Respecto al empleo de medidores de la transmitancia foliar, Loewy y Ron (2008) indicaron que en 3 de 6 ensayos el IV fue menor en el tratamiento que no recibió S, en determinaciones realizadas en espigazón. Sin embargo, sólo uno de estos mostró diferencias en el rendimiento en grano asociadas al IV.

• Maíz

El maíz es un cultivo que tiene bajo requerimiento de S por tonelada de grano (4 kg S t^{-1}) pero, dado que en comparación con otros cultivos sus rendimientos son superiores, requiere en total una mayor cantidad de S. Es por esto que se han encontrado importantes respuestas a la aplicación de fertilizantes azufrados. Steinbach y Álvarez (2012) reportaron a través de un metanálisis para la Región Pampeana $715 \text{ kg de grano ha}^{-1}$ de respuesta promedio. Similares respuestas fueron determinadas por Pagani y Echeverría (2011) en el Sudeste y Norte de Buenos Aires, con incrementos del rendimiento del 11%. Por su parte, Ferraris et al. (2006) hallaron respuesta al agregado de S en 9 de 19 ensayos realizados en la zona núcleo, siendo la misma en promedio de 1100 kg ha^{-1} , lo que representa un aumento en el rendimiento del 13%. Es válido aclarar que, al igual que para los cultivos de soja y trigo, la proporción de sitios con respuesta y los incrementos de rendimiento mencionados, no son generales para la Región Pampeana, ya que la mayoría de los ensayos fueron realizados en sitios que por sus condiciones ambientales y de manejo presentaban alta probabilidad de respuesta a la aplicación de S.

Indicadores de suelo

Diversos trabajos han intentado predecir la respuesta a S basándose en la disponibilidad de sulfato en el suelo (0-60 cm) a la siembra. Sin embargo, la mayoría de ellos no encontraron relación entre ambas variables (Salvagiotti et al., 2005; Ferraris, et al. 2006; Pagani y Echeverría, 2011; Steinbach y Álvarez, 2012). Una excepción a ello son los resultados reportados por García et al. (2010) quienes proponen un umbral del contenido de sulfato en suelo (0-20 cm) de 24 kg S ha^{-1} . De manera similar a lo discutido para soja y trigo, muchos de los sitios mal diagnosticados correspondieron a situaciones de bajo sulfato donde no se observó respuesta en rendimiento. Es por esto que el mencionado umbral requiere

ser validado. También se intentó relacionar la respuesta a S con otras variables edáficas como MO, nitrato y relación MO/arcilla + limo, pero ninguna de ellas resultó exitosa (Pagani y Echeverría, 2011; Ferraris et al., 2006).

Indicadores de planta

Tanto la concentración de S total como la relación N:S en planta no permitieron caracterizar el estatus azufrado del cultivo en estadios tempranos de desarrollo (Pagani y Echeverría, 2011). Sin embargo, en el estadio de post-floración y en madurez fisiológica, el 78 y 89% de las muestras fueron correctamente caracterizadas considerando un rendimiento relativo del 90% y una concentración de S crítica de 0.9 y 0.95 g kg^{-1} , respectivamente. Por su parte, para los mismo estadios, 67 y 72% de las muestras fueron correctamente diagnosticadas (Figura 6), considerando un RR de 95% y una relación N:S crítica de 13:1 y de 11:1, respectivamente (Pagani y Echeverría, 2011). Dado que dichas calibraciones fueron realizadas con pocos sitios y moderada deficiencia de S, surge la necesidad de validar los umbrales. Respecto al análisis de granos, no se han reportado hasta el momento trabajos en el tema, por lo que no se cuenta con umbrales para su empleo como método de diagnóstico.

Por otra parte, mediante el uso del medidor de clorofila, Pagani y Echeverría (2011) determinaron relaciones significativas entre el RR y el ISS en estadios vegetativos del cultivo (Figura 7), siendo mayor dicha relación cuando las mediciones se realizaron en hojas del estrato superior del canopeo. Sin embargo, y al igual que lo ocurrido en soja y trigo, no se cuenta hasta el momento con umbrales para dicho método. Es por esto, que se propone el uso del mismo como metodología para caracterizar el estatus azufrado del cultivo de maíz, pero se requiere continuar evaluando esta herramienta.

CONSIDERACIONES FINALES

La información generada en la última década permite establecer que la deficiencia de S en la Región Pampeana no es generalizada, pero existen ciertas condiciones que favorecen su ocurrencia (suelos de textura gruesa, baja MO, ausencia de barbechos, ambientes de alta productividad, etc.) (Figura 8).

El empleo de la disponibilidad de S en suelo en presiembra no ha logrado una adecuada carac-

terización del estatus azufrado de los cultivos. La falla más común es la ausencia de respuesta en sitios con baja disponibilidad de sulfato (Figura 8). Por lo tanto, se propone continuar evaluando dicha metodología, incluyendo los aportes de: i) S por mineralización, ii) desde horizontes sub-superficiales, y/o iii) por la napa de agua, para mejorar el diagnóstico, pese a que ello complejizaría el método.

Se han establecido umbrales que permiten diagnosticar el estatus azufrado del cultivo a partir de la relación N:S en planta, y de su uso combinado con la concentración de S total en grano (Figura 8). Sin embargo, sería conveniente validar dichos umbrales.

La determinación del ISS permitió caracterizar la disponibilidad de S en los tres cultivos, por lo que se propone su uso como metodología rápida y de bajo costo (Figura 8). Sin embargo, se requiere continuar evaluando dicho método a fin de definir con más precisión los umbrales de deficiencia.

Si bien en los últimos años se ha avanzado en el desarrollo y evaluación de métodos de diagnóstico de la disponibilidad de S, resta generar más información sobre metodologías que permitan un diagnóstico preciso, simple y de bajo costo.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo forma parte del proyecto de la UNMdP AGR447/14, del FONCyT PICT 2011-1796 y de proyectos del PN Suelos y PN CyOle del INTA.

BIBLIOGRAFÍA

- Beaton, J., y R. Soper.** 1986. Plant response to sulfur in Western Canada. In: Sulfur in Agriculture, ed. M. Tabatabai, pp. 375-405. Madison, WI: ASA-CSSA-SSSA
- Divito, G.A., y H.E. Echeverría.** 2014. Deficiencia de azufre en soja en el sudeste bonaerense: ¿una cuestión cada vez más recurrente? Revista técnica: soja. AAPRESID. pp 67-71.
- Divito, G.A., J.P. Martínez, y H.E. Echeverría.** 2014. Deficiencia de azufre en soja en el sudeste bonaerense: diagnóstico con índices ópticos. Actas XXVI Congr. Arg. de la Ciencia del Suelo y II Reunión Nacional "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas". Bahía Blanca, Argentina. 5 - 9 de mayo. En CD.
- Echeverría, H., N. Reussi Calvo, A. Pagani, y L. Fernández.** 2011. Métodos de diagnóstico de deficiencia de azufre en los cultivos de trigo, soja de segunda y maíz. Presentado en Simposio Fertilidad 2011. pp 98-107.
- Echeverría, H.E., N.I. Reussi Calvo, y A. Pagani.** 2015. Azufre. En: Echeverría, H.E.; García, F.O. (eds). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. INTA, Buenos Aires, Argentina. pp. 287-315.
- Fehr, W.R., y C.E. Caviness.** 1977. Stages of Soybean Development. Iowa State University, Ames, Iowa - USA.
- Ferraris, G.** 2005. Pautas para el diagnóstico de la fertilidad azufrada en soja. Tesis MSc. EPG-FAUBA. 176p.
- Ferraris, G., F. Gutiérrez Boem, P. Prystupa, F. Salvagiotti, L. Couretot, y D. Dignani.** 2006. Fertilización azufrada en maíz, evaluación de la respuesta del cultivo y análisis de metodologías de diagnóstico de la fertilización azufrada: reporte final. Proyecto Regional Agrícola. Desarrollo Rural INTA Pergamino. [en línea] <www.profertilnutrientes.com.ar > [consulta: 9 febrero 2015].
- García, F., M. Boxler, J. Minteguiaga, R. Pozzi, L. Firpo, I. Ciampitti, A. Correndo, F. Bauschen, A. Berardo, y N. Reussi Calvo.** 2010. La red de nutrición de la región Crea Sur de Santa Fe: resultados y conclusiones de los primeros diez años 2000-2009. Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola - AACREA. 64p.
- Gutiérrez Boem, F.H., M. Barraco, H. Echeverría, G. Ferraris, P. Prystupa, A. Quiroga, F. Salvagiotti, y H. Vivas.** 2006. Identificación de sitios deficientes en azufre mediante el análisis de grano de soja. [en línea] <www.acsoja.org.ar> [consulta: 9 febrero 2015].
- Hahtonen, M. y I. Saarela.** 1995. The effects of sulfur application on yield, sulfur-content and N:S-ratio of grasses for silage at six sites in Finland. Acta Agric. Scand. Section B. Soil Plant Science. 45:104 - 111.
- Loewy, T., y M.M. Ron.** 2008. Fertilización nitro-azufrada, expresión del índice de verdor y rendimiento del nitrógeno en trigo. Actas 7° Congr. Nac. de Trigo. Santa Rosa, La Pampa, Argentina. 2 - 4 de julio. En CD.
- Pagani, A., H.E. Echeverría, y H. Sainz Rozas.** 2009. Respuesta a nitrógeno y azufre en el cultivo de maíz en diferentes ambientes en la provincia de Buenos Aires. Ciencia del Suelo. 27:21-29.
- Pagani, A., y H.E. Echeverría.** 2011. Performance of sulfur diagnostic methods for corn. Agronomy Journal. 103:413-421.
- PROINSA.** 2013. Ronda interlaboratorio para análisis de suelos agropecuarios. [en línea] <www.minagri.gov.ar > [consulta: 9 febrero 2015].
- Reussi Calvo, N.I., H.E. Echeverría, y H. Sainz Rozas.** 2006. Respuesta del cultivo de trigo al agregado de azufre en el sudeste bonaerense. Ciencia del Suelo 24:77-87.
- Reussi Calvo, N.I., H.E. Echeverría, y H. Sainz Rozas.** 2011. Diagnosing sulfur deficiency in spring red wheat: plant analysis. Journal of Plant Nutrition. 34:573-589
- Reussi Calvo, N.I., H.E. Echeverría, y H. Sainz Rozas.** 2012. Stability of foliar N:S ratio in spring red wheat and sulphur dilution curve. Journal of Plant Nutrition. 35:990-1003.
- Russi, D., F. Gutiérrez Boem, P. Prystupa, y G. Rubio.** 2010. Análisis interlaboratorios de sulfatos en suelos II: Análisis de exactitud. Actas XXII Congr. Arg. Ciencia

del Suelo. Rosario Argentina. 31 de mayo al 4 de junio. En CD.

Salvagiotti, F., F. Gutiérrez Boem, G. Ferraris, P. Prystupa, L. Couretot, y D. Dignani. 2005. Respuesta del maíz a dosis crecientes de azufre y su relación con variables del suelo. Para mejorar la producción - INTA EEA Oliveros. 29:61-66.

Salvagiotti, F., y D.J. Miralles. 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., G. Ferraris, A. Quiroga, M. Barraco, H. Vivas, P. Prystupa, H. Echeverría, y F. Gutiérrez Boem. 2012. Identifying sulfur deficient fields by using

sulfur content; N:S ratio and nutrient stoichiometric relationships in soybean seeds. *Field Crops Reserch.* 135:107-115.

Steinbach, H.S., y R. Alvarez. 2012. Revisión del efecto de la fertilización con azufre sobre el rendimiento de trigo, maíz y soja en la región pampeana. *Actas XIX Congr. Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y XXIII Congr. Arg. de la Ciencia del Suelo.* Mar del Plata, Argentina 16 - 20 de abril.

Thomas, A., M. Boxler, B. Alvarez de Toledo, R. Houssay, L. Martín, A. Berardo, y F. García. 2002. Red de ensayos de nutrición de cultivos, región CREA sur de Santa Fe, resultados de la campaña 2001/2: soja I y soja II. 13p. [en línea] < www.ipni.net > [consulta: 9 febrero 2015].

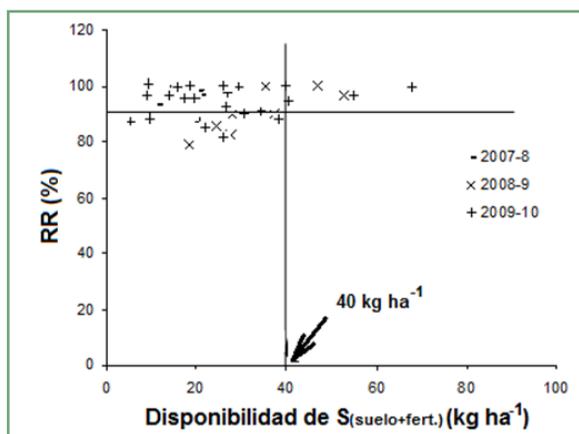


Figura 1. Rendimiento relativo (RR) de soja de segunda en función de la disponibilidad de S (S-sulfato +S del fertilizante) en el suelo en ensayos de fertilización azufrada de las campañas 2007, 2008 y 2009. (Echeverría et al., 2011).

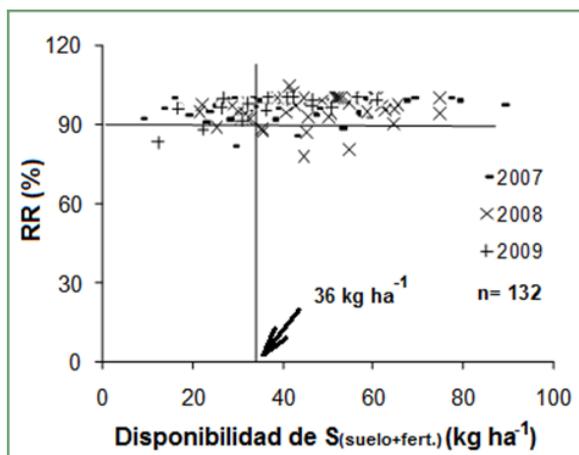


Figura 3. Rendimiento relativo (RR) de trigo en función de la disponibilidad de S (S-sulfato +S del fertilizante) en suelo en ensayos de fertilización azufrada de las campañas 2007, 2008 y 2009. n= número de muestras (Echeverría et al., 2011).

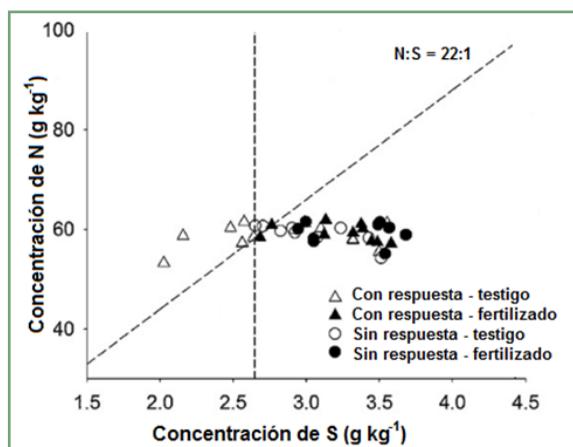


Figura 2. Relación entre la concentración total de N y S en granos de soja provenientes de cultivos con y sin respuesta a la aplicación de S. Adaptado de Salvagiotti et al. (2012).

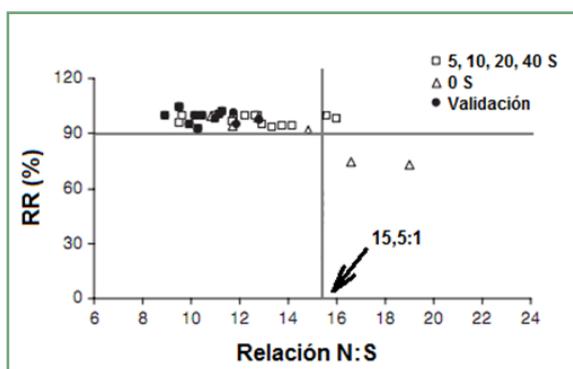


Figura 4. Rendimiento relativo (RR) de trigo en función de la relación N:S en el estadio de un nudo visible, para ensayos realizados con dosis de 0, 5, 10, 20 y 40 kg S ha⁻¹. Adaptado de Reussi Calvo et al. (2011).

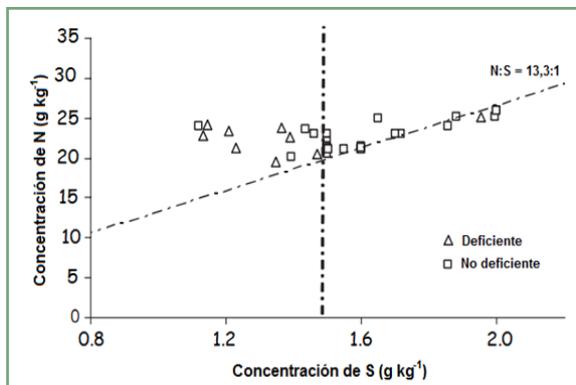


Figura 5. Relación entre la concentración total de N y S en granos de trigo provenientes de cultivos con y sin respuesta a la aplicación de S. Adaptado de Reussi Calvo et al. (2011).

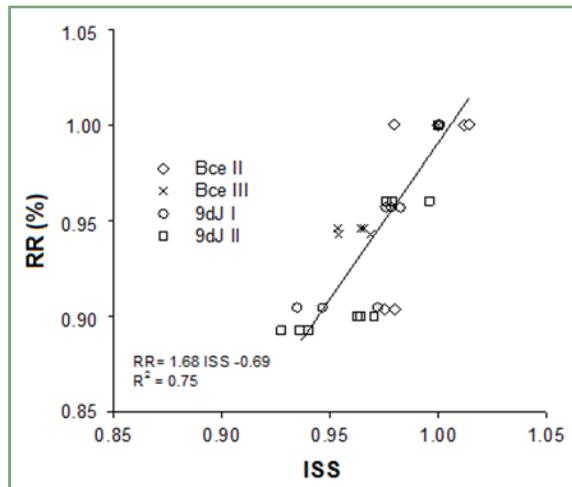


Figura 7. Relación entre el relativo (RR) y el índice de suficiencia de azufre (ISS) determinado en el estrato superior del canopeo de maíz durante el período V6-V14 Datos provenientes de ensayos en Balcarce (Bce) y 9 de Julio (9dJ) (Pagani y Echeverría, 2011).

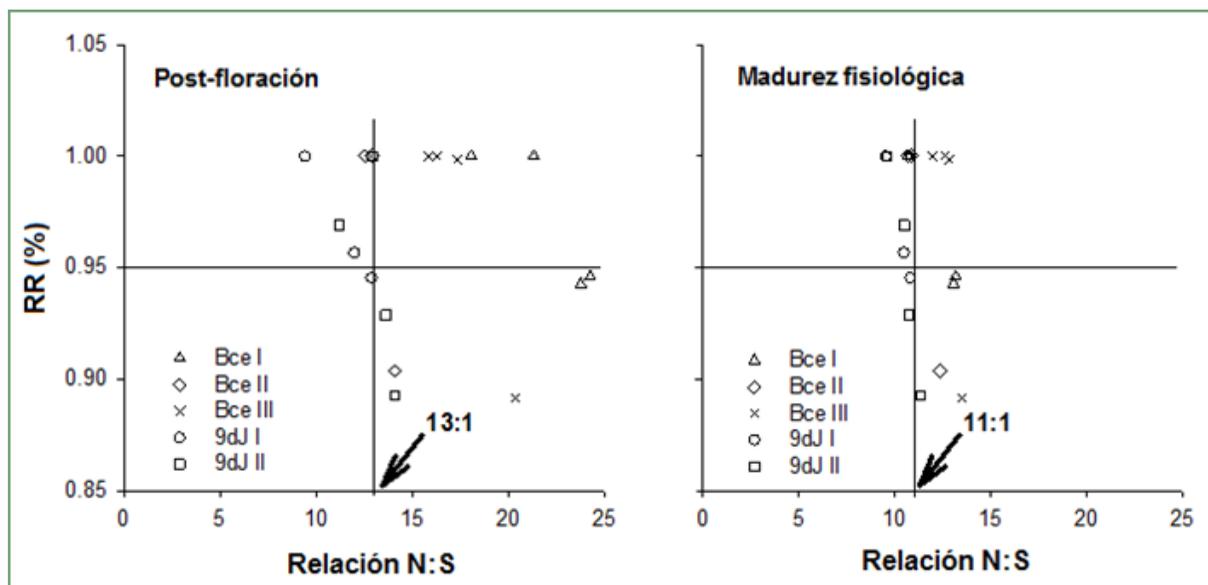


Figura 6. Rendimiento relativo (RR) en función de la relación N:S en planta entera de maíz para diferentes momentos del ciclo del cultivo. Datos provenientes de ensayos en Balcarce (Bce) y 9 de Julio (9dJ) (Pagani y Echeverría, 2011).

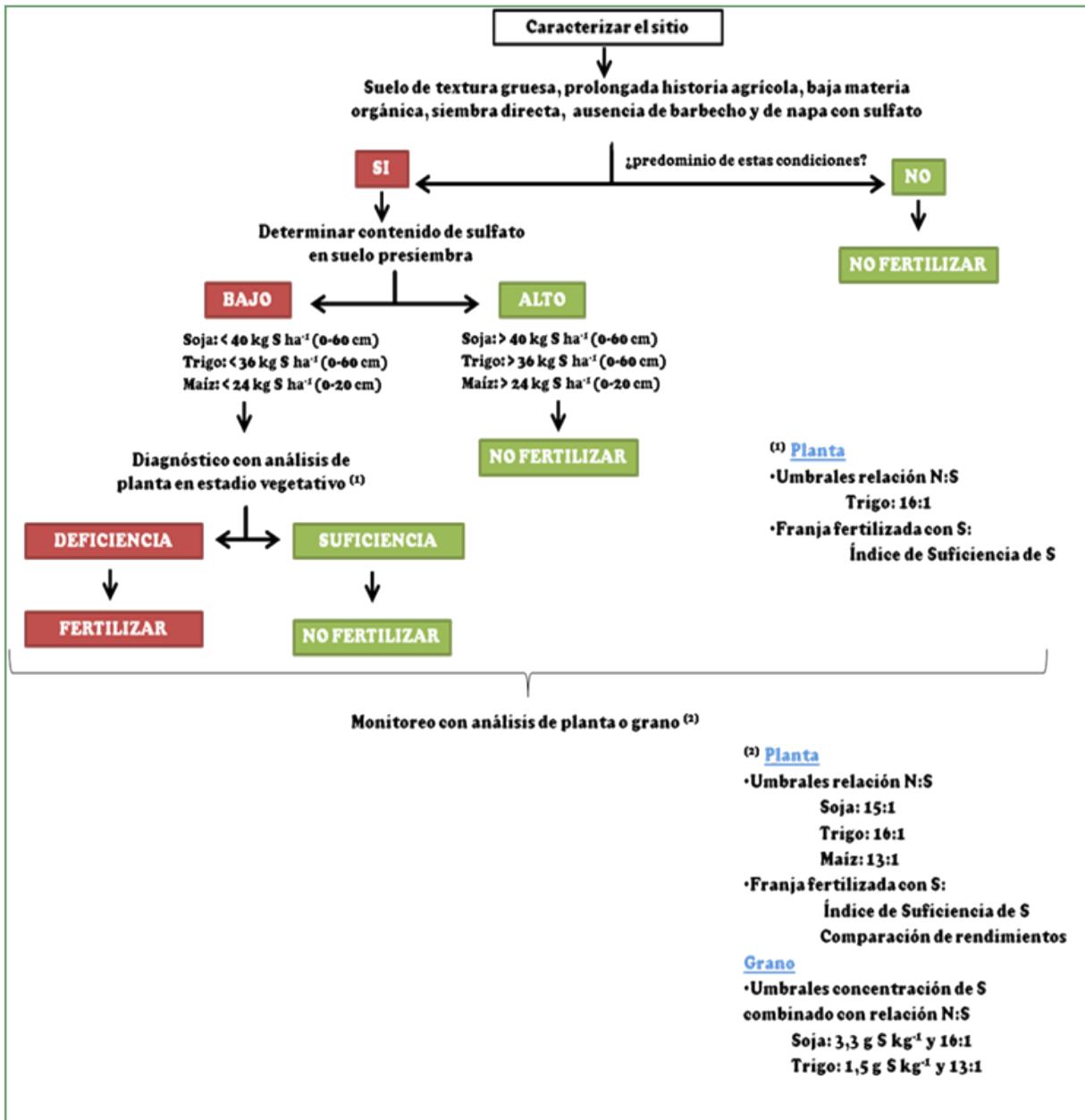


Figura 8. Árbol de decisión para la fertilización azufrada en los cultivos de soja, trigo y maíz en la región pampeana.

[volver al índice](#)

Momento de fertilización con nitrógeno y azufre y requerimientos nutricionales en maíces flint y semidentados[†]

Facundo Ferraguti^{1*}, Julio M. Castellarín¹ y Fernando Salvagiotti¹

¹EEA Oliveros - INTA

*Contacto: ferraguti.facundo@inta.gob.ar

[†]Trabajo publicado en el XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 5 al 9 de Mayo de 2014. Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.

INTRODUCCIÓN

Actualmente Argentina exporta alrededor de 400 000 t anuales de maíz flint no OGM que tienen como destino principal la Unión Europea (MINAGRI, 2013), donde es utilizado principalmente en la elaboración de cereales de desayuno. La principal característica de esta especialidad es una mayor proporción de endosperma córneo y dureza que permite obtener mayor rendimiento de fracciones gruesas durante el proceso de molienda seca (Robutti et al., 2000).

Las propiedades físicas del grano dependen en gran medida de la relación fuente-destino durante post-floración (Cirilo et al., 2011). La fertilización con nitrógeno (N) y, en menor medida, la fertilización con azufre (S) modifican la oferta de asimilados y nutrientes y afectan el peso individual y calidad de granos (Ferraguti et al., 2012). La respuesta a la fertilización con N y S en cultivos extensivos es frecuente en el área pampeana debido a la disminución progresiva del contenido de materia orgánica, como consecuencia del proceso de agriculturización, con escasa rotación e insuficiente reposición de nutrientes (Salvagiotti et al., 2012). Actualmente, la fertilización con N y S en el cultivo de maíz se realiza a la siembra y no tiene en consideración los efectos sobre la calidad de grano.

El mercado de híbridos de maíz argentino ha desplazado progresivamente los maíces flint hacia un estatus de especialidad y en favor de genotipos semidentados de mayor rendimiento. Parte de este aumento en el rendimiento puede estar determinado por una disminución del contenido de proteína en grano (Ciampitti et al., 2013). Uribe et al. (2004) demostraron que existen diferencias de absorción de N y rendimiento entre genotipos de alta proteína y de baja proteína. Debido a que los maíces flint tienen mayor contenido de proteínas de reserva en grano, es posible que el consumo de N sea superior al de los maíces semidentados. Adicionalmente, una fracción

proteica en particular, las gamma y beta zeínas, determinantes de la dureza del grano (Wu et al., 2010), requieren tanto N como S para su síntesis debido a que poseen aminoácidos azufrados en su estructura primaria, por lo que se esperaba que los híbridos flint, con mayor proporción de endosperma córneo (i.e. mayor proporción de proteínas azufradas) tengan un mayor requerimiento de S.

Los objetivos del presente trabajo fueron: i) evaluar la respuesta en rendimiento a la fertilización con N y S en diferentes momentos durante el ciclo del cultivo de un maíz flint y uno semidentado y ii) estudiar los requerimientos de N y S en ambos genotipos.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la Estación Experimental INTA Oliveros, durante las campañas 2009/10 y 2010/11 se implantaron dos genotipos con similar ciclo pero textura de grano diferente: un híbrido flint (522 Mill, Dow Agrosiences) y un híbrido semidentado (AW 190, Monsanto). La siembra se realizó con una sembradora neumática experimental a una densidad de 75000 plantas por hectárea, con una distancia entre hileras de 0,52 m. Se instaló un sistema de riego complementario por goteo para evitar stress hídrico y se controló plagas y enfermedades. El diseño del experimento fue de bloques completos al azar con 4 repeticiones.

En cada genotipo se combinaron los siguientes tratamientos de fertilización con N y S:

Fertilización con N

- i. N165: El objetivo fue alcanzar el umbral de respuesta a N calibrado localmente para ambientes de alta producción de 165 –X kg N ha⁻¹ (Salvagiotti et al., 2011), siendo X; el contenido de nitratos en los primeros 60 cm de suelo.
- ii. N50 uhd: La aplicación complementaria de 50 kg N ha⁻¹ a maíces que habían recibido el tratamiento N165 al desplegarse completamente la última hoja (uhd). La fuente utilizada fue urea granulada (0-46-0).

Fertilización con S

Se evaluó una dosis de 20 kg S ha⁻¹ en forma de sulfato de calcio (0-0-0-18 S- 20 Ca), en tres momentos de aplicación diferentes:

- iii. Aplicación total a la siembra (Ssi)
- iv. Aplicación total en uhd (Sudh)
- v. Aplicación dividida 50% a la siembra y 50% en uhd (Sdiv)
- vi. Testigos sin aplicación de S.

Los tratamientos se muestran en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Descripción de los tratamientos aplicados en el ensayo.

Tratamientos	Fertilización a la Siembra		Fertilización en uhd	
	N (kg.ha ⁻¹)	S (kg.ha ⁻¹)	N (kg.ha ⁻¹)	S (kg.ha ⁻¹)
S0 N165	165	0	0	0
Ssi N165	165	20	0	0
Sdiv N165	165	10	0	10
Sudh N165	165	0	0	20
S0 N165 + N50	165	0	50	0
Ssi N165 + N50	165	20	50	0
Sdiv N165 + N50	165	10	50	10
Sudh N165 + N50	165	0	50	20

Mediciones

Durante el ciclo del cultivo se siguió la ocurrencia de los principales eventos fenológicos (emergencia, transición del ápice, Panojado (VT), emergencia de estigmas (R1) y madurez fisiológica (R6). En R6 se determinó la biomasa total acumulada en diferentes estructuras (hojas, tallos+chalas, y granos). Las muestras de cada estructura fueron posteriormente molidas y se determinó el contenido de N y S en cada estructura, a través de espectrometría de plasma. Se determinó N y S absorbido en biomasa aérea (Nabs y Sabs), N y S exportado con el grano (Ngr y Sgr), índice de cosecha de N (ICN), índice de cosecha de S (ICS) y la relación N/S en el grano (N/S). El rendimiento a cosecha se determinó recolectando

las espigas de 7 m² de los 3 surcos centrales de la parcela y se determinó el rendimiento ajustado al 14.5% de humedad. La información fue analizada con un ANOVA y Regresión lineal simple.

RESULTADOS

Rendimiento

El rendimiento promedio del año 2 fue un 28% superior al Año 1 (13546 vs 9733 kg ha⁻¹). En cuanto a los genotipos, el híbrido flint tuvo un rendimiento promedio de 10718 kg ha⁻¹ mientras que el rendimiento del semidentado fue un 15% superior. La fertilización con N 50 uhd produjo una respuesta similar en ambos híbridos, un 7,6% de incremento por encima del rendimiento con N 165 (**Tabla 2**).

Si bien se observó respuesta al agregado de S20 (p<0,026) (**Tabla 2**), no se detectaron diferencias en el momento de aplicación en ninguno de los dos híbridos. La fertilización con S tuvo similar magnitud de respuesta en ambos híbridos para los tratamientos con N165 (ca. 2.6%). Cuando la fertilización con S20 fue acompañada con N50, la respuesta fue mayor en el híbrido semidentado (+4.16%) que en el flint (+1.46 %) (**Figura 1**).

Contenido de N y S en grano

El híbrido flint tuvo consistentemente un %Ngr mayor que el híbrido semidentado (+0,29 %). La fertilización con N 50 uhd produjo un aumento significativo del %Ngr en ambos híbridos con una misma magnitud relativa (+5.4%). La fertilización con S20 no produjo cambios significativos en el %Ngr en ningún momento evaluado. No se detectaron diferencias significativas entre híbridos ni tratamientos de fertilización para %Sgr y Sgr.

Cuando se analiza el efecto de las estrategias

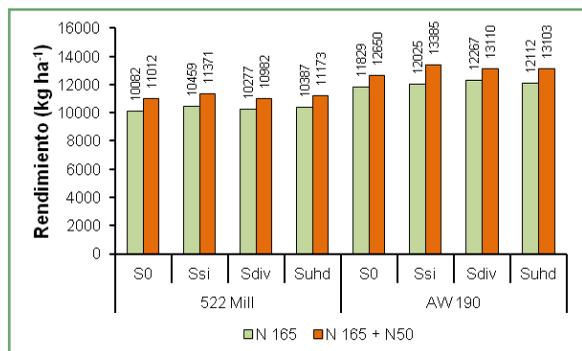


Figura 1. Rendimientos según dosis y momentos de aplicación de S y N. Las barras dentro de cada columna representan el error standard.

Tabla 2. Análisis de variancia para las variables rendimiento, contenido de N y S en grano, ICN, ICS y relación N/S en grano en dos híbridos de maíz con distintos tratamientos de fertilización nitrogenada y azufrada.

Fuente de Variación	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	valor p	N						S						N/S	valor p					
			Nabs*	valor p	N grano*	valor p	ICN	pvalor	%N gr	valor p	Sabs*	valor p	Sgrano*	valor p			ICS	valor p	%S gr	valor p	
Año	2009/10	9733	0.002	194	0.008	127	0.498	0.66	0.337	1.32	0.088	11.0	0.039	4.8	0.907	0.43	0.617	0.049	0.690	12.3	0.793
	2010/11	13546		296		187		0.63		1.38		16.9		6.5		0.39		0.048		11.5	
Híbrido	522 Mill	10718	<0.0001	261	<0.0001	161	<0.0001	0.62	<0.0001	1.50	<0.0001	15.5	<0.0001	5.1	0.570	0.33	<0.0001	0.048	0.828	10.8	<0.0001
	AW190	12560		229		152		0.67		1.21		12.4		6.2		0.49		0.049		13.0	
Dosis N50 Uhd	0	11180	<0.0001	228	<0.0001	147	0.049	0.64	0.733	1.31	0.017	13.6	0.064	5.5	0.887	0.41	0.922	0.049	0.640	11.2	0.050
	50	12098		262		167		0.65		1.40		14.3		5.8		0.41		0.048		12.6	
Dosis S	S0	11394	0.121	245	0.870	155	0.871	0.64	0.735	1.35	0.840	13.4	0.303	5.5	0.934	0.41	0.912	0.047	0.930	12.4	0.415
	Ssi	11648		246		157		0.65		1.33		13.8		5.5		0.41		0.050		11.6	
	Sdiv	11810		241		157		0.64		1.35		14.4		5.7		0.40		0.047		12.0	
	Suhd	11705		248		158		0.64		1.38		14.2		5.9		0.42		0.050		11.7	
Año*Hib			0.182		0.112		0.867		0.231		0.903		0.002		0.670		0.939		0.640		0.217
Año*N			0.091		0.001		0.024		0.216		0.298		0.289		0.879		0.456		0.955		0.047
Año*S			0.965		0.257		0.044		0.049		0.413		0.675		0.817		0.855		0.949		0.042
Hibr*N			0.497		0.193		0.647		0.061		0.638		0.043		0.395		0.605		0.251		0.602
Hibr*S			0.862		0.993		0.480		0.634		0.942		0.023		0.403		0.495		0.455		0.131
N*S			0.782		0.290		0.018		0.700		0.453		0.011		0.262		0.522		0.650		0.384
Año*Hib*N			0.181		0.895		0.275		0.002		0.973		0.389		0.887		0.320		0.973		0.125
Año*N*S			0.546		0.861		0.100		0.084		0.780		0.405		0.720		0.610		0.800		0.127
Año*Hib*S			0.824		0.644		0.952		0.145		0.751		0.013		0.019		0.265		0.150		0.018
Hibr*N*S			0.788		0.383		0.634		0.997		0.918		0.222		0.260		0.417		0.567		0.177
Año*Hib*N*S			0.257		0.442		0.757		0.542		0.332		0.026		0.091		0.077		0.397		0.184
Test S vs Fert S20	S0	11394	0.026	245	0.949	155	0.532	0.64	0.783	1.34	0.620	13.4	0.108	5.5	0.935	0.41	0.836	0.050	0.981	12.4	0.157
	S20	11721		245		157		0.64		1.37		14.1		5.7		0.41		0.050		11.7	

de fertilización con S sobre Ngr, la tendencia es similar al %Ngr aunque se detecta una interacción N*S significativa ($p > 0.018$) que indicaría mayor exportación de N cuando la aplicación de N50 es acompañada por S20. También se detectó interacción significativa para Año*N ($p > 0.024$) y Año*S ($p > 0.044$), indicando mayor respuesta a los tratamientos en el Año 2, el año con mayor rendimiento medio (Tabla 2).

Relaciones entre nutrientes y rendimiento e índice de cosecha de nutrientes

En la Figura 2 se muestra el rendimiento obtenido en función del total de N y S absorbidos a madurez fisiológica. Se observa que, para un rendimiento dado, el híbrido flint acumuló mayor cantidad de N absorbido. En línea con estos resultados, cuando se analiza la relación entre el rendimiento y el S absorbido, se evidencia un mayor requerimiento de S del híbrido flint para lograr el mismo rendimiento que el híbrido semidentado. El análisis de la inversa de la pendiente de las relaciones en las Figura 2 a y 2 b muestran que el requerimiento de N es de 18.5 y 24.7 kg N por Mg de rendimiento para los híbridos semidentado y flint, respectivamente. En el caso del consumo de S, el requerimiento fue respectivamente de 1 y 1.5 kg S por Mg de rendimiento.

El ICN, ICS y la relación N/S gr fue altamente dependiente del híbrido. El híbrido flint tuvo menor ICN, ICS y N/S gr ($p > 0.0001$) y las estrategias de fertilización no lograron modificar sustancialmente

estos parámetros. Sin embargo, se detectó interacción significativa entre Año*N y Año*S, que indican que las prácticas de fertilización con N y S modificaron la relación N/S en el Año 2 cuando los rendimientos fueron mayores (Tabla 2).

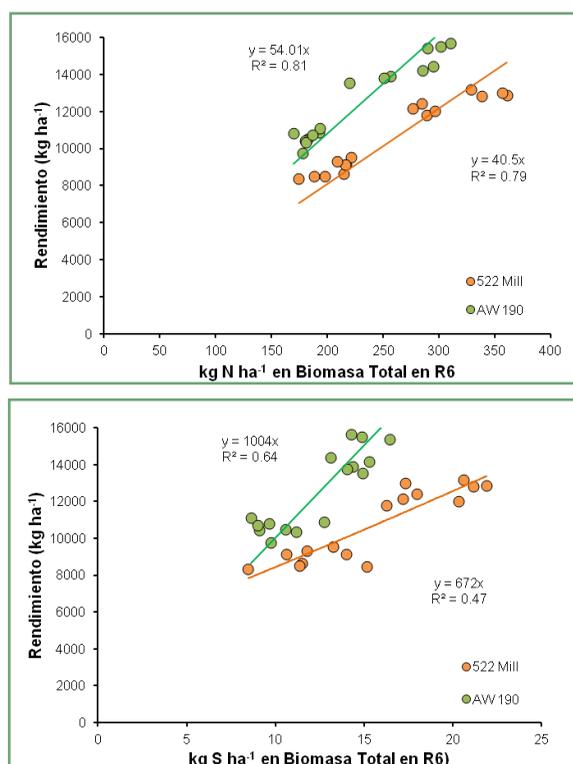


Figura 2. Rendimiento de maíz en función del N y S absorbidos a madurez fisiológica.

DISCUSIÓN

Se pudo establecer, en concordancia con estudios previos, realizados con un número mayor de genotipos (Ferraguti et al., 2012) (Balbi et al., 2010), que el híbrido semidentado obtuvo un rendimiento promedio un 15% superior al flint. Si bien se podría esperar que el híbrido semidentado demande más N debido a su mayor potencial de rendimiento, el híbrido flint posee más %Ngr y en definitiva ambos genotipos aumentaron en la misma magnitud su rendimiento al ser fertilizados con N50. Es probable que la respuesta observada en ambos híbridos al agregado de N50 se deba a que la aplicación tardía produce un aumento de rendimiento a través de un mayor número de granos y el sostenimiento de la fuente durante el llenado de granos (Muchow, 1999).

Ambos materiales tuvieron el mismo incremento de rendimiento cuando se fertilizaron con S20, independientemente del momento de aplicación. Esto indicaría que la provisión de S también estaría limitando la expresión del potencial de rendimiento. Las diferencias más evidentes entre híbridos se presentaron cuando se combinaron las dosis de N50 uhd y S20. En este caso el híbrido flint casi no modificó su rendimiento con respecto a la dosis de N50, mientras que el híbrido semidentado aumentó un 4% (Figura 1).

Es probable que la dosis N 165 haya sido suficiente para alcanzar el máximo %Ngr en el semidentado, mientras que la adición de N 50 produjo un aumento de %Ngr y N gr en el híbrido flint. Uribebarrea et al. (2004) mostró resultados similares al comparar un híbrido de alta proteína y bajo potencial de rendimiento con uno de baja proteína y alto potencial de rendimiento. Mientras que el %Sgr fue similar en ambos híbridos y no fue influenciado por los tratamientos aplicados, al analizar Sgr se observó que el genotipo semidentado exporta mayor cantidad de S en grano (Tabla 2). El híbrido flint demostró tener menor ICS que el semidentado, pero demanda más S por Mg de rendimiento (Figura 2).

CONCLUSIONES

La fertilización con N y S aumentó los rendimientos en ambos híbridos partiendo de la dosis de N165 como base aunque el híbrido semidentado tuvo un rendimiento constantemente superior. El híbrido flint, requirió dosis mayores de N para un mismo rendimiento que el híbrido semidenta-

do, debido principalmente a mayor N abs. Los requerimientos de S para el híbrido flint también fueron superiores a los del híbrido dentado.

BIBLIOGRAFÍA

- Balbi, C. N., O. R. Valentinuz, y J. Prause.** 2010. Calidad de Maíz Colorado Flint para Industria Cervecera en Corrientes, Argentina. *Inf. tecnol.* 2010, vol.21, n.3, pp. 141-148. ISSN 0718-0764.
- Ciampitti, I. A., y T.J. Vyn.** 2013. Grain nitrogen source changes over time in maize: A review. *Crop Science*, 53(2), 366-377.
- Cirilo A.G., M. Actis, F.H. Andrade, y O.R. Valentinuz.** 2011. Crop management affects dry-milling quality of flint maize kernels. *Field Crops Research* 122, 140-150.
- Ferraguti F., F. Salvagiotti, y J. Castellarín.** 2012. Rendimiento y calidad de maíz según estrategias de fertilización con nitrógeno y azufre. *Boletín infoINTA Santa Fe Sur.* N° 13. Versión web: <http://inta.gob.ar/personas/ferraguti.facundo>
- MINAGRI.** 2013. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. <http://www.minagri.gob.ar/site/index.php>.
- Muchow, R.C.** 1998. Nitrogen utilization efficiency in maize and grain sorghum. *Field Crops Research*, 56(1), 209-216.
- Robutti, J., F. Borrás, M. Ferrer, M. Percibaldi, y C.A. Knutson.** 2000. Evaluation of Quality Factors in Argentine Maize Races. *Cereal Chem.* 77:24-26.
- Salvagiotti, F., J.M. Castellarin, F. Ferraguti, y H.M. Pedrol.** 2011. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz según potencial de producción y disponibilidad de nitrógeno en la región pampeana norte. *Ciencia del Suelo* 29 (2).
- Salvagiotti F., G. Ferraris, A. Quiroga, M. Barraco, H. Vivas, P. Prystupa, H.E. Echeverría, y F.H. Gutierrez-Boem.** 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.
- Uribebarrea, M., F. Below, y S.P. Moose.** 2004. Grain Composition and Productivity of Maize Hybrids Derived from the Illinois Protein Strains in Response to Variable Nitrogen Supply. *Crop Sci.* 44:1593-1600.
- Wu, Y. y J. Messing.** 2010. RNA Interference-Mediated Change in Protein Body Morphology and Seed Opacity through Loss of Different Zein Proteins. *Plant Physiol.* 153:337-347

[volver al índice](#)

Efectos de diferentes estrategias de fertilización sobre los rendimientos, el balance de nutrientes y su disponibilidad en los suelos en el largo plazo

G.N. Ferraris^{1*}, M. Toribio², R. Falconi³ y L. Couretot¹

¹Desarrollo Rural INTA Pergamino, ²Profertil S.A. Investigación y Desarrollo, ³El Ceibo Cereales S.A.

*Contacto: ferraris.gustavo@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

A nivel productivo, las deficiencias de nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) no ocurren de manera aislada sino que se combinan de diversas maneras, por lo que es necesario evaluar integralmente la respuesta a la fertilización y conocer su efecto sobre la fertilidad edáfica de los suelos. Con el propósito de estudiar la evolución en el tiempo de los rendimientos, el balance de nutrientes y las propiedades químicas del suelo se diseñó un ensayo de estrategias de fertilización NPS en la secuencia maíz-soja-trigo/soja-cebada/soja (Mz-Sj-Tr/Sj-Ce/Sj). El proyecto se inició en la campaña 2006/07, con maíz como el primer cultivo, llegando a dos ciclos completos de la rotación en la campaña 2013/14. En este escrito se reporta el efecto de las diferentes estrategias de fertilización NPS sobre: 1) el rendimiento de Trigo/Soja 2013/14; 2) los rendimientos acumulados, el balance de nutrientes y su nivel final en el suelo luego de ocho años (2006/07-2013/14); 3) la eficiencia de recuperación de P; y 4) la rentabilidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo es conducido en la localidad de Arribeños, partido de General Arenales. Se plantea en un diseño en bloques al azar, con cuatro repeticiones, integrando una rotación de seis cultivos en cuatro años (M-Sj-T/Sj-C/Sj). Cabe aclarar que en el segundo ciclo de la rotación se cambió Trigo/Soja por Cebada/Soja en el orden. El inicio de la secuencia se realizó con el cultivo de maíz, durante la campaña 2006/07, culminando dos ciclos con el doble cultivo Tr/Sj en la campaña 2013/14. Los tratamientos implican cinco manejos diferentes de fertilización, donde los fertilizantes son agregados en cobertura total al momento de la siembra (**Tabla 1**).

Los fertilizantes fosforados y azufrados se aplicaron al voleo al momento de la siembra del cultivo de trigo. Como fuentes se utilizaron superfosfato triple de calcio (0-20-0), superfosfato simple de calcio (0-9-0-12S) y urea granulada (46-0-0).

Tratamiento	Criterio de fertilización	Rendimiento Objetivo (kg/ha)	N	P	Azufre (S)	Urea (46-0-0)	SPT (0-20-0)	SPS-S (0-9-0-18S)
T1	Testigo sin fertilización	No especificado	0	0	0	0	0	0
T2	Tecnología Uso Actual	No especificado	46	16 + 0	0	100	80 + 0	0
T3	Reposición PS Rendimiento objetivo medio	4000 + 2500	83	16 + 15	7 + 8	180	55 + 47	57 + 68
T4	Reposición PS Rendimiento objetivo alto	5000 + 3500	113	20 + 22	9 + 11	245	68 + 65	71 + 95
T5	Reposición S Reconstrucción P Rendimiento objetivo alto	5000 + 3500	113	36 + 22	9 + 11	245	148 + 65	71 + 95

Tabla 1. Tratamientos y dosis (kg ha⁻¹) de N, P y S aplicados en la secuencia Trigo/Soja en la campaña 2013/14. Se describen las demandas del doble cultivo, pero los fertilizantes fueron aplicados en su totalidad al primero. Estrategias de fertilización en una secuencia de cultivos, Arribeños, General Arenales. Campaña 2013/14, octavo año de ensayos.

Determinaciones realizadas

En el suelo

Previo a la siembra de trigo se obtuvieron muestras de suelo de 0 a 20 cm. De cada parcela, en cada uno de los bloques, 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 el cultivo

A cosecha se evalúan el rendimiento de los cultivos y sus componentes, número y peso de los granos. En una muestra de grano de cada parcela se cuantificó el contenido de N, P y S. Con los datos de rendimiento, concentración de nutrientes en grano y dosis aplicada de los mismos se realizó un balance de nutrientes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Efectos sobre los rendimientos del año. Trigo/soja. Campaña 2013/14

Durante la campaña 2013/14, se determinaron diferencias significativas en los rendimientos de trigo ($P=0.0006$) y soja de segunda ($P=0.0004$). Tanto en trigo como en soja, los tratamientos T3 a T5 superaron al testigo. Los rendimientos máximos fueron alcanzados en los tratamientos T2 a T5 para trigo, y en T4 y T5 para soja de se-

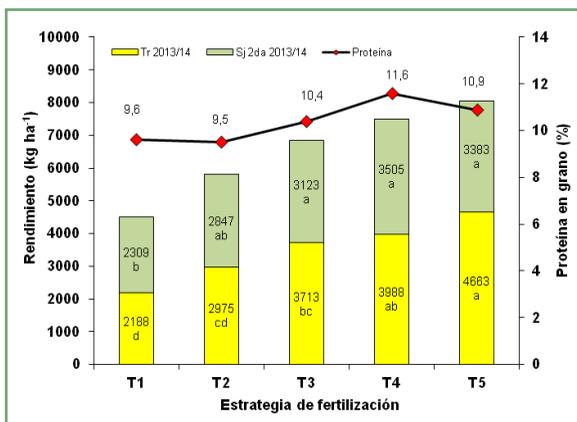


Figura 1. Rendimiento de la secuencia trigo/soja como resultado de diferentes estrategias de fertilización, y su comparación con igual secuencia anterior. Dentro de cada cultivo, letras distintas sobre las columnas indican diferencias significativas entre tratamientos. Las barras verticales representan la desviación estándar de la media. Ensayo de estrategias de fertilización en una secuencia de cultivos. Campaña 2013/14. Arribeños, General Arenales.

gunda (Figura 1). Las diferencias de rendimiento entre el tratamiento de máxima fertilización y el testigo alcanzaron un 113% en trigo y 46.5% en soja de segunda, reflejando el efecto acumulativo de las estrategias sobre la fertilidad de los suelos y, como consecuencia, sobre los rendimientos. El escenario de esta campaña contrasta con la anterior correspondiente a igual secuencia (Tr/Sj 2da de 2008/09), afectado por la particular sequía durante el ciclo de ambos cultivos.

B. Efectos sobre los rendimientos acumulados, el balance de nutrientes y su nivel final en el suelo luego de ocho años: 2006/07-2013/14.

La productividad acumulada de la secuencia –doce cultivos en ocho campañas– mantuvo su tendencia consistente en ampliar la diferencia entre tratamientos conforme el paso del tiempo. Así, mientras el testigo acumuló 36 924 kg grano ha⁻¹, el tratamiento T5 de reconstrucción llegó a 57 952 kg ha⁻¹, siendo la brecha de rendimiento de 57% (Figura 2).

Con los datos de concentración de nutrientes en grano, los rendimientos y la dosis aplicada de cada uno de ellos es posible estimar el balance para cada tratamiento (Tabla 2). El balance de N fue negativo para todas las estrategias, incluso considerando el aporte por fijación biológica (FBN). Aun ponderando los ingresos vía este mecanismo, los balances variaron desde -288 a -562 kg N ha⁻¹. Aunque el balance de N en los cultivos

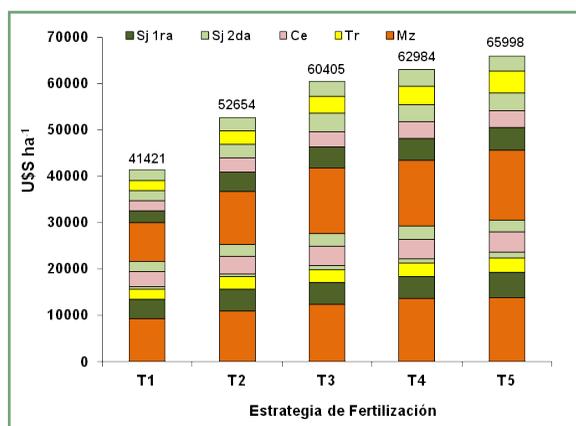


Figura 2. Producción por cultivo (kg ha⁻¹) de diferentes estrategias de fertilización acumulada en una secuencia maíz - soja - trigo/soja - cebada/soja - maíz - soja. - cebada/soja – trigo/soja. Arribeños, General Arenales. Campañas 2006/07 a 2013/14.

de gramíneas tiende a ser neutro o positivo (datos no mostrados), el cultivo de soja -al no fertilizarse con N- genera los mayores balances negativos, dado que la FBN cubre aproximadamente la mitad de la demanda del cultivo (Collino et al., 2007).

En P y S, los tratamientos testigo y de tecnología de uso actual (T1, T2) reflejaron un balance negativo,

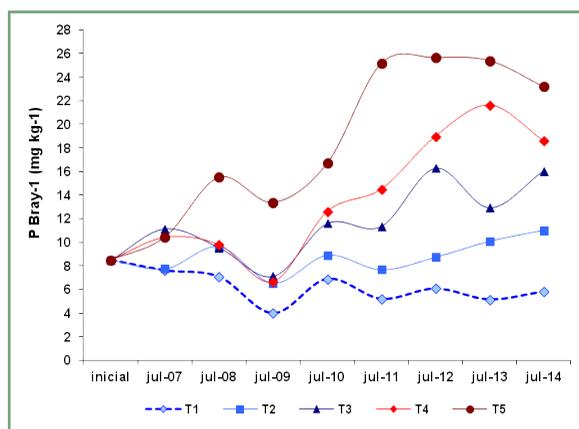


Figura 3. Evolución del P extractable en suelo (Bray-1, 0-20 cm) según estrategia de fertilización, luego de ocho campañas y doce cultivos. Los valores presentados son promedio de cuatro repeticiones.

mientras que en aquellos de reposición se sobreestimó la extracción del nutriente dando como resultado un balance positivo (T3, T4, T5) (Tabla 2).

La evolución en el tiempo de la concentración de P Bray-1 en suelo (Figura 3) reflejó las tendencias observadas en los balances de Tabla 2. Incrementos muy notables en el P Bray-1 como resultado de un balance positivo de P fueron documentados por Mallarino y Prater (2007), quienes postulan que la tasa de incremento de P en suelo es superior en el rango medio de disponibilidad, y que una vez alcanzado un nivel alto es necesario agregar mayores dosis de P para mantener/aumentar su concentración en el suelo, por el permanente pasaje de P en solución o adsorbido a fracciones más estables.

El contenido de MO, N total y el pH no manifestaron cambios importantes, aunque el testigo fue el tratamiento con menores niveles finales de MO y pH más alto, de acuerdo con su menor aporte de residuos, menor exportación de bases y la ausencia de efecto acidificante de los fertilizantes (Tabla 3). Es probable que los plazos abarcados por esta experiencia sean todavía breves para reflejar efectos de mayor magnitud.

Tabla 2. Balance de nitrógeno, fósforo y azufre (kg ha^{-1}) para los diferentes tratamientos durante la secuencia 2006/07 -2013/14. Los datos de rendimiento y extracción de nutrientes en grano fueron ajustados a 13% de humedad. Cuando se pondera el N aportado por fijación biológica de N (FBN), se considera que el 50% en leguminosas proviene de esa fuente.

Tratamiento	Agregado (kg ha^{-1})				Extracción (kg ha^{-1})			Balance (kg ha^{-1})			
	N (Fertilizante)	N (FBN)	P	S	N	P	S	N (Fertilizante)	N (FBN)	P	S
T1	0	509	0	0	1071	111	41	-1071	-562	-111	-41
T2	276	616	128	0	1323	152	49	-1047	-431	-24	-49
T3	454	662	230	120	1488	169	62	-1034	-372	61	58
T4	599	698	291	154	1585	179	63	-986	-288	112	91
T5	599	694	419	154	1639	196	68	-1040	-346	223	86

Tabla 3. Análisis de suelo (0-20 cm) luego de ocho campañas, y su comparación con el nivel al inicio del experimento. Los datos son promedio de cuatro repeticiones.

Tratamiento	MO (%)	pH	N total (%)	N-NO_3^- 0-40 cm (kg ha^{-1})	P Bray-1 (mg kg^{-1})	S-SO_4^{2-} (mg kg^{-1})
Inicial	2.38	5.6	0.119	17.8	8.5	13.8
T1	2.62	5.60	0.131	20.0	5.8	8.2
T2	2.67	5.45	0.133	18.3	11.0	8.2
T3	2.55	5.45	0.127	20.4	16.1	9.5
T4	2.62	5.40	0.131	20.6	18.6	8.4
T5	2.64	5.45	0.132	22.6	23.2	8.5

La relación entre el balance de P (**Tabla 2**) y el P Bray-1 determinado en el suelo al final de la cosecha (**Figura 3, Tabla 3**) permite estimar la tasa de cambio en función de la extracción o reposición del nutriente. En la **Figura 4**, la inversa de la pendiente que relaciona estos parámetros indica la dosis de P o balance negativo necesario para variar en 1 mg kg⁻¹ el nivel del análisis de P Bray-1 en el suelo. De acuerdo con este análisis, por cada 5.4 kg P ha⁻¹ por sobre o debajo de lo extraído por cosecha, el nivel de P en suelo cambiaría en una unidad. Esta tasa de cambio ha bajado en los últimos años, luego de alcanzar un máximo de 11.9 kg P ha⁻¹ en 2009, luego del tercer año de ensayo. Es probable que la acumulación de fracciones lábiles de P sature cargas positivas y disminuya así la retención/fijación del P aportado mediante fertilización, permitiendo ganancias de P marcadas en las estrategias ubicadas en el lado positivo del balance. En otros experimentos fue observado un rango de variación relativamente estable a lo largo del tiempo (Messiga et al., 2010). La pendiente de la relación entre nivel final de P y balance es más consistente y presenta mayor ajuste en el rango de balance negativo en comparación con el lado positivo, donde se observa una mayor variabilidad de datos (**Figura 4**). En algunos casos, particularmente provenientes de los años 2012, 2013 y en menor medida 2014, pareciera dividirse la pendiente, siendo de menor magnitud en los procesos de ganancia de P que en los de pérdida. Este comportamiento dual fue observado por Ciampitti (2009), a partir de

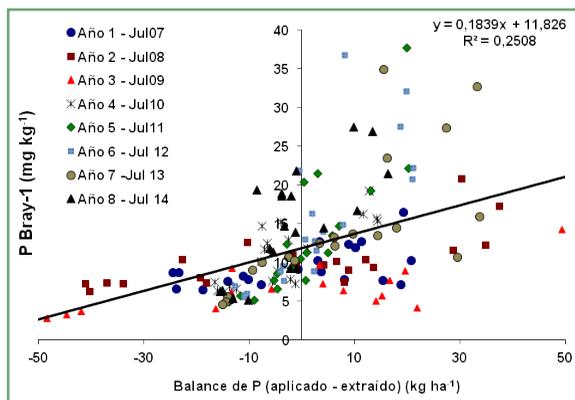


Figura 4. Relación entre el nivel de P extractable en suelo a cosecha (0-20 cm, mg kg⁻¹) luego de ocho años y el balance de P (aplicado-extraído en kg ha⁻¹) determinado en cada tratamiento. Campañas 2006/07 a 2013/14. La inversa de la pendiente indica la cantidad de P que es necesario agregar (o retirar) para variar la concentración de P en suelo en 1 mg kg⁻¹.

ensayos conducidos en el sur de Santa Fe, sobre suelos similares a los de este sitio experimental. Sin embargo, si en el presente ensayo se particiona la pendiente de la relación, no difieren de una pendiente única, por lo que se decide mantener esta última ($P > 0.10$).

Eficiencia de recuperación de P según cultivo y estrategia de fertilización

En función de la dosis de P aplicada, los rendimientos y la concentración de P en grano se calculó la eficiencia de recuperación del fertilizante aplicado. Para ello se transformaron los valores de P en grano a P en planta entera según los índices de cosecha de P propuestos por IPNI (2013).

La eficiencia de recuperación de P en planta entera osciló entre 0.24 y 0.36, siendo menor en la medida en que aumentó la dosis aplicada (**Figura 5**). Los cultivos mostraron una capacidad variable de recuperación del fertilizante aplicado (**Figura 6**). El comportamiento general muestra una mayor eficiencia en cultivos de verano con relación a los de invierno, entre los de primera siembra. En campañas climáticamente similares, el maíz del quinto año asimiló mayor proporción de fertilizante que el del primero, probablemente a causa de la acumulación de fracciones lábiles de P con las sucesivas fertilizaciones. En cambio, la soja absorbió en planta una proporción similar entre la campaña 2007/08 y 2011/12, aunque esta última fue notoriamente más seca que la primera. La soja de segunda fue el cultivo con menor eficiencia de captura del P agregado en la secuencia –fue aplicado antes del cultivo de

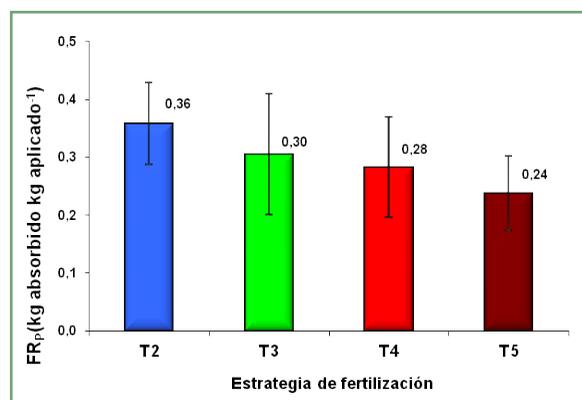


Figura 5. Fracción de fósforo recuperada en planta entera según estrategia de fertilización. Las barras verticales representan la desviación estándar de la media. Ensayo de larga duración, Arribeños, General Arenales. Campañas 2006/07 a 2013/14.

invierno- afectado por la mayor capacidad de la gramínea para absorber nutrientes, su siembra en segundo lugar después de la fertilización, y los períodos secos que suele atravesar un cultivo de segunda sin barbecho previo. Por último, el trigo y la soja de la campaña seca 2008/09 recuperaron muy poco fertilizante en comparación con la cebada/soja de los ciclos húmedos 2009/10 y 2012/13, o la misma secuencia de trigo/soja en la campaña 2013/14 (Figura 6).

Rentabilidad de la fertilización

En la Figura 7 se muestra la distribución del ingreso entre inversión en fertilizantes y rentabilidad de la misma, acumulada luego de 8 años, actualizando los precios de cereal y fertilizantes a Noviembre de 2014. La fertilización fue económicamente rentable. La estrategia de mínima o uso actual (TUA-T2) alcanzó menor rentabilidad que aquellas de reposición o reconstrucción. Estas últimas evidenciaron una rentabilidad similar entre sí. De este modo, el T3 (Reposición PS para rendimientos moderados) expresó mayor retorno a la inversión, pero el aporte adicional especialmente de P para reconstrucción significa una capitalización, por el mayor nivel de P en suelo y los aportes de C (carbono) adicionales derivados de mayores rendimientos.

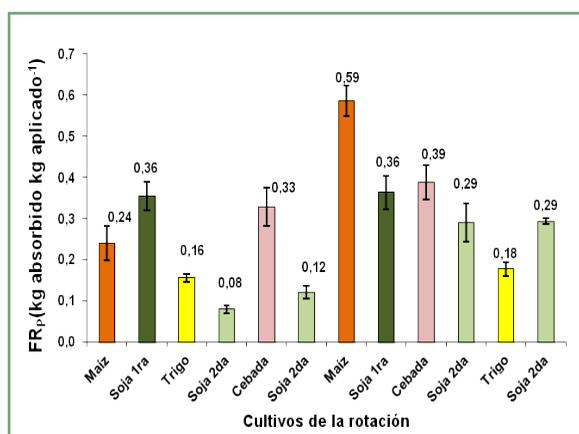


Figura 6. Fracción de fósforo recuperada en planta entera según cultivo. Las barras verticales representan la desviación estándar de la media. Ensayo de larga duración, Arribeños, General Arenales. Campañas 2006/07 a 2013/14.

CONSIDERACIONES FINALES

- * Las estrategias de fertilización impactaron en los rendimientos, modificaron el balance de nutrientes y este a su vez correlacionó fuertemente con los niveles finales de P en suelo.
- * Las diferencias en producción de granos entre estrategias se amplían campaña tras campaña. Así, la diferencia entre los tratamientos T5 y T1 alcanza luego de 8 años y 12 cultivos a un 59.3 %.
- * Para P y S, estrategias pensadas como de reposición finalmente resultaron ser de reconstrucción. Por este motivo, antes de evaluar la viabilidad técnica y económica de un esquema de fertilización, es importante cuantificar los niveles de entrada y salida de nutriente para un sistema productivo y ambiente en particular.
- * Diferentes dosis de aplicación de nutrientes generaron cambios previsible de su disponibilidad en el suelo. Luego de ocho años de experimentación, la tasa de cambio fue de 1 mg kg⁻¹ de P Bray (0-20 cm) por cada 5.43 kg P ha⁻¹ de diferencia entre agregado y extracción. La relación cambia ligeramente año tras año, con una tendencia a disminuir evidenciando una acumulación de fracciones lábiles en el suelo. Sin embargo, la relación se tornó más robusta y no se verificaron cambios sustanciales desde el sexto año en adelante.

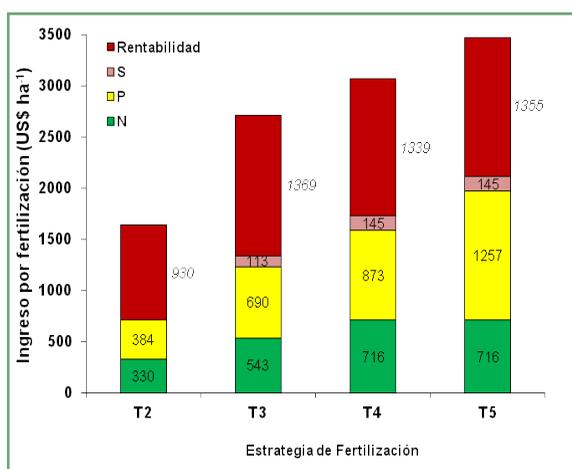


Figura 7. Ingreso adicional de las estrategias de fertilización y su distribución en inversión en fertilizantes nitrogenados, fosforados, azufrados y la rentabilidad de la fertilización. Valores expresados en US\$ con precios de insumos, cereal y gastos de comercialización actualizados a noviembre de 2014.

- * La recuperación media de P en planta entera – estimando un índice de cosecha de referencia– alcanza alrededor de un 30% del P aplicado, en coincidencia con los valores mencionados en la bibliografía.
- * La fertilización resultó económicamente rentable. Las estrategias de reposición y reconstrucción (T3, T4 y T5) resultaron con rentabilidades equivalentes, aun sin considerar la capitalización en nutrientes ante balances más positivos como consecuencia de las mayores dosis de aplicación en todos los nutrientes.

y factores que la limitan en diferentes regiones del país. Actas XXIII Reunión Latinoamericana de Rizobiología. Los Cocos, Córdoba. Argentina.

Mallarino, A.P., y J. Prater. 2007. Corn and soybean grain yield, P removal, and soil-test responses to long-term phosphorus fertilization strategies. Proceeding 19th Annual Integrated Crop Management Conference, Ames, Iowa State University.

Messiga, A.J., N. Ziadi, D. Plenet, L.E. Parent, y C. Morel. 2010. Long-term changes in soil phosphorus status related to P budgets under maize monoculture and mineral P fertilization. Soil Use and Management, 26, 354–364. ■

BIBLIOGRAFÍA

IPNI. 2013. Cálculo de requerimientos nutricionales. Planilla de cálculo para estimar la absorción y extracción de nutrientes en cereales, oleaginosas, industriales y forrajeras. IPNI Programa Latinoamérica Cono Sur. Disponible on line <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024>

Ciampitti, I.A. 2009. Dinámica del fósforo del suelo en rotaciones agrícolas en ensayos de nutrición a largo plazo. M.Sc. thesis. FA-UBA. Buenos Aires, Argentina. XX pag.

Collino, D., M. de Luca, A. Peticari, S. Urquiaga, y R. Racca. 2007. Aporte de la FBN a la nutrición de la soja

[volver al índice](#)

Intensificación de secuencias basadas en soja y su efecto sobre el nitrógeno del suelo

J.P. Martínez^{1*}, P.A. Barbieri^{1,2}, G. Cordone³, F. Martínez³, H.R. Sainz Rozas^{1,2}, H.E. Echeverría¹, y G.A. Studdert¹

¹Unidad Integrada Balcarce FCA UNMDP-E.E.A. INTA, ²CONICET, ³AER INTA Casilda, Santa Fe.

*Contacto: juanpablomartinez999@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

En la Argentina, el cultivo de soja (*Glycine max* (L.) Merr.), abarca en la actualidad más del 50% de la superficie cultivada (MAGyP, 2012). Esto fue debido a la incorporación de nuevas áreas para su producción, al aumento de su frecuencia en la rotación y, en otros lugares, al monocultivo, lo cual puede tener efectos negativos sobre el suelo, alterando su productividad y, por lo tanto, la sustentabilidad del sistema de producción (Martínez, 2002). Debido al escaso aporte de residuos de la soja (Domínguez y Studdert, 2006) y a la baja relación carbono/nitrógeno (C/N) de los mismos, el aumento de su frecuencia en la rotación lleva a una disminución en las fracciones lábiles de la materia orgánica (MO) (Studdert y Echeverría 2000). La dinámica de la MO está muy relacionada con la del N, siendo éste el principal nutriente limitante para la producción agrícola. Si bien la soja tiene la capacidad de fijar el N atmosférico, con ello generalmente no cubre sus requerimientos del nutriente, resultando en un balance negativo en el suelo (Álvarez et al., 1995). Salvagiotti et al. (2008) reportaron que al estimar el aporte de N al suelo de la soja teniendo en cuenta el N proveniente de las raíces junto con el de los residuos aéreos, el balance de este nutriente en algunas situaciones puede llegar a ser neutro o sólo ligeramente negativo.

El N se encuentra en el suelo en su mayor proporción (95-99%) bajo la forma orgánica y, mediante el proceso de mineralización, el N orgánico total (NOT) es convertido por microorganismos del suelo en iones amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-). Dichos iones, son las principales formas en las que el N es absorbido por las raíces de las plantas (Brady y Weil 1999). Por lo tanto, la concentración de NOT es considerada un indicador la calidad del suelo (Sainju et al., 2002). El NOT, puede separarse en su fracción más lábil (particulado, NOP) y su fracción más estable asociada al limo y las arcillas (asociado, NOA) (Cambardella y Elliott, 1992). La capacidad potencial del suelo para mineralizar N puede estimarse mediante la

cuantificación del NH_4^+ producido luego de una incubación anaeróbica de corta duración (Nan). En suelos del sudeste bonaerense, Genovese et al. (2009) determinaron que el Nan disminuye a medida que aumentan los años de agricultura, lo cual sugeriría su utilidad como indicador de la degradación de los mismos. Por otro lado, se han reportado estrechas relaciones entre el Nan, el carbono orgánico particulado (COP) y el NOP, los cuales son indicadores tempranos del efecto de las prácticas de manejo sobre la dinámica del C y N (Fabrizzi et al., 2003; Wyngaard, 2011).

En la Región Pampeana, el contenido de MO de los suelos prístinos depende principalmente del clima y la textura de los mismos (Álvarez y Steinbach, 2006). La disminución de la MO en esta región, han sido de relevancia, y, dependiendo de las características del suelo y de la zona, podría ser de hasta un 50% del nivel de MO original (Álvarez, 2001; Lavado, 2006). Más recientemente, Sainz Rozas et al. (2011) determinaron que las mayores reducciones en los contenidos de MO respecto de suelos prístinos habrían ocurrido hacia el norte y oeste de la Región Pampeana.

A pesar del deterioro que presenta el suelo a causa de la actividad agrícola, y al efecto negativo que puede ocasionar el aumento de la frecuencia de la soja en la rotación, la rentabilidad y simplicidad de manejo de este cultivo hacen que su producción se encuentre en creciente expansión (Calviño y Monzón, 2009; Melgar et al., 2011). En tal sentido, existe la necesidad de identificar prácticas de manejo tendientes a mejorar el balance de carbono (C) y N en secuencias basadas en el cultivo de soja sin disminuir su producción, para mantener la calidad del suelo y la sustentabilidad del sistema productivo.

La cantidad y la calidad de los residuos ingresados al suelo junto con las labranzas son los principales factores que afectan los pools de C y N en el suelo. Por lo tanto, la fertilización con P y S al cultivo de soja podría mantener y/o mejorar el rendimiento en grano y paralelamente incrementar la acumulación de biomasa cuando dichos nutrientes son limitantes para la producción. Otra

forma de aumentar la producción de biomasa y, en consecuencia, la entrada de N al sistema, sería la intensificación sustentable del sistema de producción mediante el aumento del número de cultivos por año (Caviglia y Andrade, 2010). En tal sentido, el índice de intensificación de las secuencias de cultivos (ISI) indica la cantidad de cultivos por año en una secuencia, y se relaciona positivamente con la eficiencia en el uso de los recursos (Caviglia y Andrade, 2010). La inclusión de cultivos de cobertura (CC) de gramíneas previo a soja, permiten la utilización del agua y la radiación durante el período invernal y captan N del suelo durante el período de barbecho (Restovich et al., 2012; Martínez et al., 2013), lo cual puede disminuir posibles pérdidas por lavado (Kaspar et al. 2012). Además, éstos responden a la oferta de N aumentando la producción de biomasa (Ruffo et al., 2004, Martínez et al., 2013). Por lo tanto, su empleo sería una alternativa para evitar las fugas perjudiciales de N del suelo e incrementar el ingreso de C y N orgánico en secuencias basadas en soja (Cordone y Martínez, 2004). En suelos de Georgia (EEUU), Sainju et al. (2002) reportaron que la inclusión de CC aumentó el COT y el NOT del suelo mejorando su productividad. Una rotación fertilizada con N, P y S, que incluya cultivos con un alto volumen de residuos y un alto ISI sería otra forma de incrementar el aporte de residuos al suelo.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la fertilización con P y S, la inclusión de cultivos CC y de una rotación con un alto ISI, sobre el contenido de NOT, NOP y el Nan y la relación entre dichos indicadores en secuencias con predominio del cultivo de soja en dos ambientes de la Región Pampeana Argentina.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de los tratamientos

Se trabajó sobre dos ensayos de larga duración, uno iniciado en 2007 en Arequito, Caseros, Santa Fe, sobre un Argiudol típico con textura superficial franco-limosa (Sitio 1) y otro iniciado en 2006 en la E.E.A. INTA Balcarce, Buenos Aires, sobre un Argiudol Típico con menos de 2% de pendiente y textura superficial franca (Sitio 2). En ambos sitios el diseño experimental fue en bloques completos aleatorizados con 3 repeticiones que incluyeron los siguientes tratamientos: soja continua sin fertilización (Sj); soja continua fertilizada con P y

S (Sjf); CC / soja con P y S (CC/Sjf); CC fertilizado con N / soja con P y S (CCf/Sjf); rotación fertilizada con N, P y S (Rot) que incluye los cultivos de maíz (*Zea mays L.*), trigo (*Triticum aestivum L.*) / soja 2° y CCf/Sjf. Los ensayos se establecieron sobre suelos con más de 25 años de agricultura continua y signos de degradación. Al inicio de los ensayos el pH, el COT y el P-Bray a la profundidad de 0-20 cm fueron 5.83; 15.2 g kg⁻¹ y 12.2 mg kg⁻¹, respectivamente, en el Sitio 1 y 5.40; 26.7 g kg⁻¹ y 14.0 mg kg⁻¹, respectivamente, en el Sitio 2. Los CC utilizados fueron Triticale (*x Triticosecale Wittmack*) y Avena (*Avena sativa L.*) en los Sitios 1 y 2, respectivamente y su secado se realizó en los estados de encañazón avanzado a preemergencia floral Z34-Z41 (Zadocks et al., 1974) mediante una aplicación de 3-4 L ha⁻¹ de glifosato (48% i.a.). Las fertilizaciones con P y S fueron de reposición, teniendo en cuenta la extracción de nutrientes por los cultivos de cada secuencia. La fertilización con N al trigo y maíz fueron las óptimas para alcanzar los máximos rendimientos de acuerdo al potencial de cada región. Las dosis de nutrientes para cada secuencia se detallan en la **Tabla 1**.

Muestreo de suelos y determinaciones

Luego de 4 años de la implementación de las secuencias de cultivos, durante el otoño se realizó un muestreo de suelo en los estratos 0-5, 5-10, 10-15 y 15-20 cm de profundidad en cada unidad experimental. Todas las muestras se secaron a 30°C en estufa con circulación forzada de aire y fueron molidas hasta pasar por un tamiz de 2 mm de apertura de malla. En forma complementaria se determinó la densidad aparente en cada unidad experimental (Blake y Hartge, 1986). Para la determinación del Nan se realizó una incubación anaeróbica a 40 °C durante 7 días (Keeney, 1982). Luego se cuantificó el NH₄⁺ mediante destilación por arrastre con vapor (Bremner y Keeney, 1965) de las muestras incubadas y sin incubar. Los valores de Nan surgieron de la diferencia entre la concentración de NH₄⁺ inicial de las muestras sin incubar y luego de la incubación.

La determinación del NOP se realizó por diferencia entre la concentración de NOT y NOA (Cambardella y Elliott, 1992). El fraccionamiento de las muestras de suelo para obtener el NOA se realizó según la metodología descrita por Cambardella y Elliott (1992). Para la determinación del NOT, las muestras de suelo sin fraccionar se molieron hasta pasar por un tamiz de 0,5 mm. El

contenido de NOT y NOA del suelo se cuantificó por el método de Dumas, para lo cual se sometió a las muestras a combustión a 950 °C y posterior detección de N por termoconductividad mediante un analizador TruSpec CN (LECO, 2011). Los datos de concentración de NOT y NOP de todas las profundidades fueron integradas y llevadas a Mg ha⁻¹ utilizando una masa equivalente de 2666 Mg ha⁻¹ para el estrato de 0-20 cm. Para las comparaciones en 0-5 cm se utilizó una masa equivalente de 605 Mg ha⁻¹. La concentración de Nan de cada profundidad fue integrada en el estrato 0-20 cm siguiendo el mismo criterio que para el caso del N y fue expresada en mg kg⁻¹.

Estimación del aporte de residuos

La cantidad de residuos aéreos retornados al suelo se calculó con los datos de biomasa aérea acumulada de los CC y la estimación de los residuos aéreos de los cultivos de soja, trigo y maíz considerando su rendimiento e índice de cosecha. En el Sitio 1 se consideraron valores de índices de cosecha de 0.38, 0.42 y 0.5 para soja, trigo y maíz, respectivamente (Milesi Delaye et al., 2013), mientras que en el Sitio 2 fueron de 0.40, 0.45 y 0.45 para soja, trigo y maíz (Echeverría y Studdert, 2000). El aporte de C de las raíces y exudados radicales se calculó según las relaciones raíz:parte aérea propuestas por Buyanovsky y Wagner (1997) las cuáles fueron 0.38, 0.48 y 0.35 para soja, trigo y maíz, respectivamente. Asimismo, se consideró que del aporte total de C a través de raíces y rizodeposiciones, la proporción que se localizó en el estrato 0-20 cm fue 0.84, 0.90 y 0.91 para soja, trigo y maíz, respectivamente (Buyanovsky y Wagner, 1986).

Análisis estadístico

Los análisis de la varianzas se realizaron utili-

zando el paquete estadístico SAS (SAS Institute, 1988) mediante un análisis combinado entre ambos sitios experimentales. Para ello se utilizó el procedimiento PROC-MIXED, evaluándose como fijos los efectos del sitio y la secuencia y como aleatorio el bloque anidado dentro del sitio. Se analizó el efecto principal de la secuencia cuando no se registró interacción sitio x secuencia ($p < 0.05$), y en caso contrario, los efectos simples de las secuencias dentro de cada sitio. Cuando se registraron diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0.05$), las medias fueron comparadas mediante el test de diferencias mínimas significativas (DMS). Los análisis de regresión lineal entre el Nan y el NOT, NOA y NT se realizaron mediante el procedimiento PROC-REG de SAS (SAS Institute, 1988) utilizando un nivel de significancia $p < 0.05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La cantidad de residuos retornados al suelo por los cultivos de cada secuencia, registró interacción significativa entre sitio y secuencia ($p < 0.05$). Sin embargo, en ambos sitios los monocultivos de soja (Sj y Sjf) acumularon una menor ($p < 0.05$) cantidad de residuos en los 4 años de desarrollo de las secuencias, que los tratamientos CC/Sjf; CCf/Sjf y Rot (**Tabla 2**). Esto es debido principalmente a la mayor productividad y cantidad de residuos asociada con la cantidad de cultivos intervinientes por año (CC y doble cultivo) en las secuencias CC/Sj, CCf/Sjf y Rot, (mayor ISI) comparado con Sj y Sjf. Esto coincide con lo reportado por Caviglia et al. (2004) y Martínez et al. (2013) que reportaron una alta relación entre el ISI y la productividad del sistema. El incremento en la productividad en los tratamientos que incluyeron CC fue más evidente cuando se aplicó N, lo que aumentó significativamente la producción de biomasa de los CC. Algo a considerar es que

Tabla 1. Dosis de nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) aplicado a las secuencias en cada estación de crecimiento.

Secuencia	Sitio 1				Sitio 2			
	2007/8	2008/9	2009/10	2010/11	2006/7	2007/8	2008/9	2009/10
	N-P-S (kg ha ⁻¹)							
Sj	0-0-0	0-0-0	0-0-0	0-0-0	0-0-0	0-0-0	0-0-0	0-0-0
Sjf	0-26-17	0-23-29	0-23-29	0-24-30	0-24-16	0-21-15	0-21-16	0-20-15
CC/Sj	0-26-17	0-23-29	0-23-29	0-24-30	0-24-16	0-21-15	0-21-16	0-20-15
CCf/Sjf	46-26-17	0-23-29	44-23-29	43-24-30	100-24-16	120-21-15	90-21-16	90-20-15
Rot	46-26-17	107-28-12	108-24-24	43-24-30	50-20-16	180-35-11	90-21-16	120-20-15

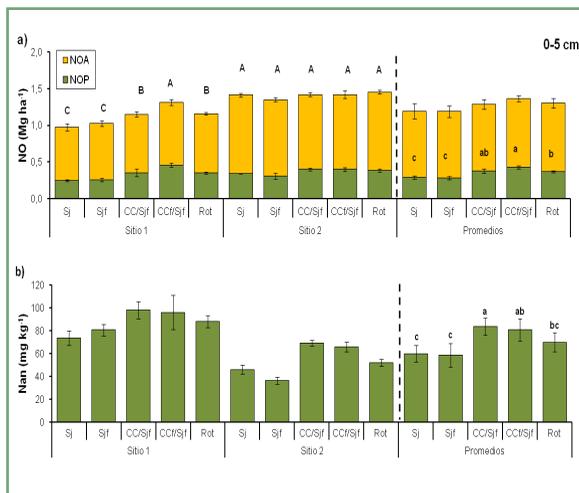


Figura 1. Nitrógeno orgánico asociado (NOA), particulado (NOP) y total (NOT = NOP + NOA) (a) y N liberado como amonio en incubación anaeróbica de corta duración (Nan) (b) para la profundidad 0-5 cm, luego de 4 años de desarrollo de las secuencias: soja continua sin fertilización (Sj); soja continua fertilizada con P y S (Sjf); cultivo de cobertura (CC)/ soja con P y S (CC/Sjf); CC fertilizado con N / soja con P y S (CCf/Sjf); rotación del alto ISI fertilizada con N, P y S (Rot), en el Sitio 1 y Sitio 2. Letras similares mayúsculas indican que no hay diferencias significativas entre tratamientos para NOT, mientras que letras similares minúsculas indican que no hay diferencias significativas para NOP y Nan según test MDS ($p < 0.05$). Barras verticales indican error estándar de la media.

en el Sitio 1 el aporte de los CC fue sólo de 3 campañas ya que en 2008/09 no se sembraron CC por cuestiones operativas.

A la profundidad de 0-5 cm el NOT registró interacción significativa ($p < 0.05$) sitio x secuencia. El contenido de NOT en el Sitio 1 fue mayor ($p < 0.05$) en la secuencia CCf/Sjf, seguida de CC/Sjf y Rot (1.31, 1.15 y 1.16 $Mg\ ha^{-1}$, respectivamente) mientras que en los monocultivos Sj y Sjf (0.97 y 1.03 $Mg\ ha^{-1}$, respectivamente), se registró un menor valor (Figura 1 a). Esta tendencia puede ser explicada por el diferente aporte de residuos de las secuencias, sin embargo, en el Sitio 2 no se registraron diferencias significativas entre tratamientos. En dicho sitio, en promedio el NOT registró los mayores valores (1.41 vs 1.12 $Mg\ ha^{-1}$ para los Sitios 2 y 1, respectivamente), lo cual es explicado por su mayor contenido de MO inicial, consecuencia de una menor historia agrícola y un régimen de menores temperaturas comparado con el Sitio 1. Una posible causa que explique la ausencia de efecto de las secuencias sobre el NOT en el Sitio 2 sería el mayor contenido de MO inicial, lo que atenúa los efectos del aporte de residuos diferencial sobre el contenido de C y N, y a la menor producción de biomasa en este sitio, lo que redundaría en un menor aporte de residuos por las secuencias respecto del Sitio 1.

El NOP no registró interacción significativa ($p < 0.05$) sitio x secuencia y en ambos sitios fue mayor ($p < 0.05$) en la secuencia CCf/Sj, seguida de CC/Sj, y Rot, tendencia que coincide con la encontrada para el NOT en el Sitio 1. El Nan no

Tabla 2. Cultivos intervinientes y aporte de residuos (biomasa aérea, raíces y exudados radicales) acumulados en base seca (MS residuos) durante 4 años de desarrollo de las secuencias (C acumulado): soja continua sin fertilización (Sj); soja continua fertilizada con P y S (Sjf); cultivo de cobertura (CC)/ soja con P y S (CC/Sjf); CC fertilizado con N / soja con P y S (CCf/Sjf); rotación de alto ISI fertilizada con N, P y S (Rot), en las localidades de Arequito (Sitio 1) y Balcarce (Sitio 2). Letras similares mayúsculas y minúsculas indican que no hay diferencias significativas entre sitios y secuencias, respectivamente, según test DMS ($p < 0.05$).

Secuencia	Sitio 1					MS residuos ($Mg\ ha^{-1}$)	Sitio 2				
	07/08	08/09	09/10	10/11	06/07		07/08	08/09	09/10	MS residuos ($Mg\ ha^{-1}$)	
	Cultivos						Cultivos				
Sj	Sj	Sj	Sj	Sj	37.2 d	Sj	Sj	Sj	Sj	21.7 c	
Sjf	Sj	Sj	Sj	Sj	39.7 d	Sj	Sj	Sj	Sj	23.0 c	
CC/Sjf	CC/Sj	Sj*	CC/Sj	CC/Sj	77.6 b	CC/Sj	CC/Sj	CC/Sj	CC/Sj	43.0 b	
CCf/Sjf	CC/Sj	Sj*	CC/Sj	CC/Sj	85.2 a	CC/Sj	CC/Sj	CC/Sj	CC/Sj	47.2 a	
Rot	CC/Sj	Mz	Tr/Sj2°	CC/Sj	63.5 c	Mz	Tr/Sj2°	CC/Sj	Mz	43.2 ab	

Tr/Sj2° = trigo / soja de segunda; Mz = maíz; Sj = soja; CC = cultivo de cobertura

*no se sembraron CC

registró interacción significativa ($p < 0.05$) sitio x secuencia (**Figura 1 b**). Dicho indicador fue mayor en CC/Sjf y CCf/Sjf seguido de Rot, mientras que Sj y Sjf registraron los menores valores (83.6, 80.8, 69.9, 59.8 y 58.3 Mg ha^{-1} , respectivamente, en promedio para ambos sitios), lo que en líneas generales coincide con lo observado en el NOP y con el aporte de residuos de las secuencias. Algo a destacar es que si bien el Sitio 1 registró menores niveles de NOT, los valores de Nan fueron mayores que en el Sitio 2 (87.3 y 53.7 mg kg^{-1} para los Sitios 1 y 2, respectivamente) lo cual puede ser explicado por el diferente potencial de mineralización de las fracciones del NOT entre los sitios debido a su diferente textura.

Al integrar los datos en el estrato 0-20, el NOT registró interacción significativa sitio x secuencia ($p < 0.05$) sitio x secuencia, mientras que el NOP y el Nan no registraron interacción ($p > 0.05$). El NOT y el NOP registraron mayores valores en el Sitio 2, mientras que el Nan que registró mayores valores en el Sitio 1 (**Figura 2**), coincidiendo con lo observado en 0-5 cm. En el Sitio 1, el NOT fue mayor ($p < 0.05$) en la secuencia CCf/Sjf, seguida de Rot y CC/Sjf (3.84, 3.66 y 3.65 Mg ha^{-1} , respectivamente), mientras que Sj y Sjf registraron los menores valores (3.33 y 3.31 Mg ha^{-1} , respectivamente) (**Figura 2 a**). Sin embargo, en el Sitio 2 no se registraron diferencias ($p < 0.05$) entre los tratamientos y el NOT registró un valor promedio de 5.73 Mg ha^{-1} .

En ambos Sitios, al evaluar los efectos principales el NOP fue mayor en CCf/Sjf (1.08 Mg ha^{-1}) seguido de Rot, CC/Sjf y Sj (1.00; 0.94 y 0.90 Mg ha^{-1}), que no difirieron entre sí ($p < 0.05$), mientras que Sjf registró el menor valor (0.78 Mg ha^{-1}). El Nan, sin embargo, fue mayor en las secuencias con mayor aporte de residuos que no difirieron ($p < 0.05$) entre sí (42.3; 42.6 y 41.6 mg kg^{-1} para CC/Sjf, CCf/Sjf y Rot, respectivamente), mientras que en Sj y Sjf no difirió y registró los menores valores (33.2 y 32.1 mg kg^{-1} , respectivamente) (**Figura 2 b**). Esto refleja la utilidad del Nan como un indicador temprano de los cambios en el suelo provocados por diferentes manejos y concuerda con lo reportado por Doran y Parking (1994), Fabrizzi et al. (2003) y Soon et al. (2007). Otro aspecto a considerar es que en 0-20 cm, coincidiendo con lo observado a 0-5 cm, el Nan fue menor en el Sitio 2, aún con un mayor NOT y NOP comparado con el Sitio 1, lo cual, como ya fue mencionado,

puede haberse debido a la diferente textura de los suelos.

Al relacionar el Nan con las diferentes fracciones de N en el estrato de 0-20 cm (**Figura 3**) se puede observar que sólo se registró una asociación significativa con el NOT en el Sitio 1. En el Sitio 2 sólo se registró asociación significativa entre el Nan y el NOP, aunque con un bajo r^2 (0.39). En líneas generales, la escasa variación entre secuencias registrada en 0-20 cm para NOA y NOT en el Sitio 2 (**Figura 2**), es la principal causa de su falta de asociación con el Nan, el cual, a diferencia de los anteriores, registró cambios más importantes entre los diferentes tipos de manejo.

En el Sitio 1, se pudo observar una considerable asociación entre el Nan y el NOA ($r^2 = 0.64$). Esta asociación puede explicar los mayores niveles de Nan del Sitio 1 respecto al Sitio 2, a pesar de registrar menores valores de NOP, NOT. Por lo tanto en el Sitio 1, las fracciones del NO asociadas a las partículas minerales tendrían una mayor labilidad que en el Sitio 2, con lo cual esta fracción podría aportar mayor cantidad de N a través de la mineralización. Esto puede ser explicado por

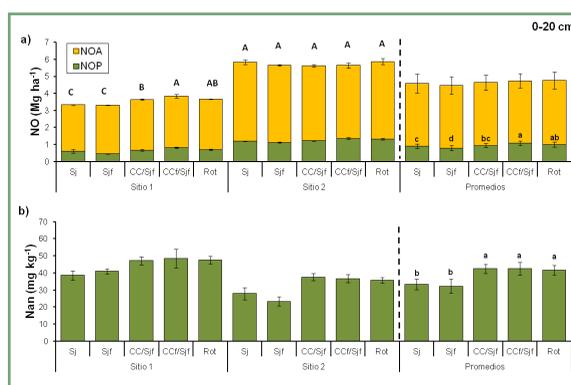


Figura 2. Nitrógeno orgánico (NO) asociado (NOA), particulado (NOP) y total (NOT = NOP + NOA) (a) y N liberado como amonio en incubación anaeróbica de corta duración (Nan) (b) para la profundidad 0-20 cm, luego de 4 años de desarrollo de las secuencias: soja continua sin fertilización (Sj); soja continua fertilizada con P y S (Sjf); cultivo de cobertura (CC)/soja con P y S (CC/Sjf); CC fertilizado con N / soja con P y S (CCf/Sjf); rotación del alto ISI fertilizada con N, P y S (Rot), en el Sitio 1 y Sitio 2. Letras similares mayúsculas indican que no hay diferencias significativas entre tratamientos para NOT, mientras que letras similares minúsculas indican que no hay diferencias significativas para NOP y Nan según test MDS ($p < 0.05$). Barras verticales indican error estándar de la media.

el mayor % de limo en el Sitio 1 (64.4% vs 36.2% para el Sitio 1 y 2 respectivamente). Por tal motivo, teniendo en cuenta que el porcentaje de arcillas es similar entre sitios, el Sitio 1 tiene una mayor proporción del NOA asociado al limo.

El grado de humificación de los residuos de las plantas asociados a partículas minerales del suelo es mayor a medida que disminuye el tamaño de las partículas de suelo. Por lo tanto, las arcillas,

debido a su menor tamaño de partícula y su alta superficie específica, son capaces de formar complejos arcillo-húmicos con baja relación C/N y baja labilidad (Guggenberger et al., 1995; Six et al., 2002). Los agregados provenientes del limo son menos estables que los provenientes de las arcillas (Plante et al., 2006), razón por la cual en estos se facilita el ataque microbiano y la mineralización de la MO (Six et al., 2002). Este proceso explicaría que la relación entre el Nan y el NOA registrada en el Sitio 1 se deba a la mayor proporción de limo en su suelo, comparado con el Sitio 2. A su vez, esta tendencia explica que el Sitio 1 con menores niveles de NOT pueda registrar mayores valores de Nan comparado con el Sitio 2. Esto evidencia la contribución del NOA a la mineralización del N en el Sitio 1.

Los efectos de las secuencias registradas en este estudio sugieren indicios de un manejo más sustentable del sistema de producción con la inclusión CC o una rotación de cultivos con alto ISI comparado con la monocultura de soja. Esto se evidenció en ambos sitios en el NOP y el Nan, y aunque para el caso del NOT sólo en el Sitio 1. Sin embargo, es esperable que a más largo plazo los efectos de los diferentes manejos evaluados en este estudio se magnifiquen y también sean reflejados en la concentración de N total en el Sitio 2. Estos resultados están en línea con lo reportado por Sainju et al. (2002) quienes determinaron aumentos en el NOT debido a la inclusión de CC, los cuales aportaron una considerable cantidad de residuos al suelo. Sin embargo, la fertilización con P y S al cultivo de soja, si bien provocó un mayor aporte de residuos (en menor medida y estadísticamente no significativo), no mejoró ninguno de los indicadores evaluados en este estudio luego 4 años de desarrollo de las secuencias, coincidiendo por lo reportado por Wyngaard et al., (2012) en su ensayo de 7 años de duración con una rotación de maíz, soja y trigo/soja. Sin embargo, como fue mencionado, es esperable que a más largo plazo, el efecto de prácticas de manejo que incrementen la cantidad de residuos retornados al suelo sea reflejado en mayor medida por estos indicadores.

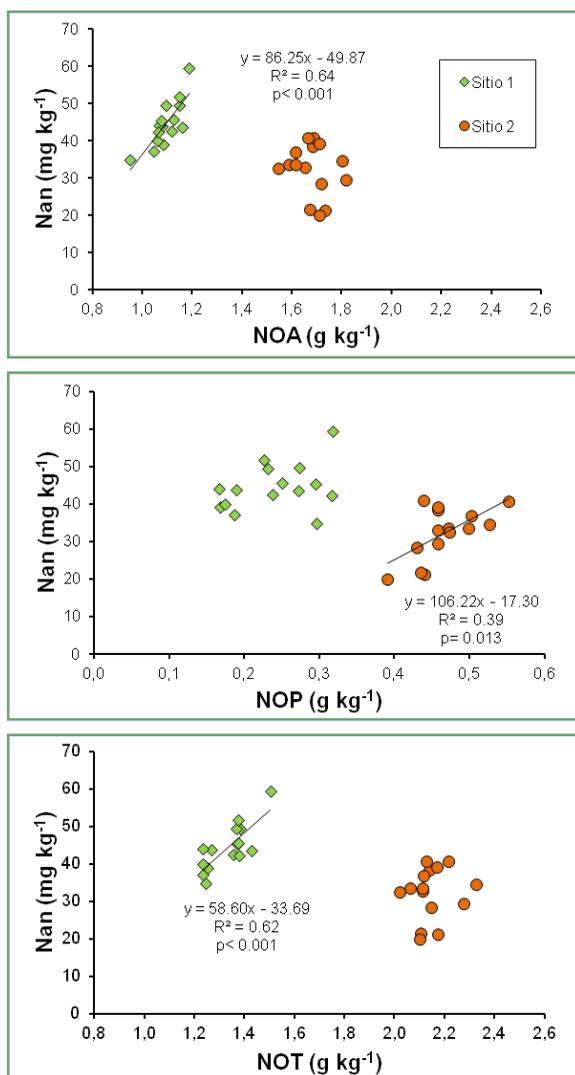


Figura 3. Relación entre el N liberado como amonio en incubación anaeróbica de corta duración (Nan) y el Nitrógeno orgánico (NO) asociado (NOA), particulado (NOP), total (NOT = NOP + NOA), en el estrato 0-20 cm. Luego de 4 años de desarrollo de las secuencias: soja continua sin fertilización (Sj); soja continua fertilizada con P y S (Sjf); cultivo de cobertura (CC)/ soja con P y S (CC/Sjf); CC fertilizado con N / soja con P y S (CCf/Sjf); rotación del alto ISI fertilizada con N, P y S (Rot), en el Sitio 1 y Sitio 2.

CONCLUSIÓN

La inclusión de CC y una rotación de cultivos de alto ISI en secuencias con predominio del cultivo de soja establecidas sobre dos Argiudoles con prolongada historia agrícola, provocó incrementos en el NOP y Nan luego de 4 años de su establecimiento, lo que indica un mayor potencial de mineralización del N del suelo. Estos resultados sugieren que la implementación de dichas prácticas de manejo contribuye a mejorar el balance de N en el suelo bajo secuencias basadas en soja, incrementando la productividad del recurso y la sustentabilidad del sistema de producción.

Agradecimientos

Parte de estos resultados pertenecen al trabajo: Nitrógeno orgánico y Nan en secuencias con predominio de soja publicado en Actas del XXIV Congreso Argentina de la Ciencia del Suelo y II Reunión Nacional "Materia orgánica y sustancias húmicas" Este trabajo se realizó en el marco de los proyectos INTA PNCER 0022421 Módulo 4.2, PNCYO 1127033 y UNMP AGR383/12.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, R.** 2001. Estimation of carbon losses by cultivation from soils of the Argentine Pampa using the Century Model. *Soil Use Manage.* 17:62-66.
- Álvarez, R., J.H. Lemcoff, y A.H. Merzari.** 1995. Balance de N en un suelo cultivado con soja. *Ciencia del Suelo* 13:38-40.
- Blake, G.R., y K.H. Hartge.** 1986. Bulk density. In (A. Klute ed) 'Methods of soil analysis', Part. 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. (ASA, CSSA and SSSA, Madison, WI.) pp. 363-375.
- Bremner, I.M., y D.R. Keneey.** 1965. Steam distillation method for determination of ammonium, nitrate and nitrite. *Anal Chim Acta.* 32:485-495.
- Brady, N.C., y R.R. Weil.** 1999. The nature and properties of soil. 20th Ed. Prentice-Hall, Inc Simons and Schuster a Viacom Company. Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- Buyanovsky, G.A., y G.H. Wagner.** 1986. Post-harvest residue input to cropland. *Plant Soil.* 93:57-65.
- Buyanovsky, G.A., y G.H. Wagner.** 1997. Crop residue input to soil organic matter in the Sanborn field. Paul E.A. et al. (Eds.). *Soil organic matter in temperate ecosystems: Long-term experiments in North America.* CRC Press, Boca Raton, FL. USA. pp. 73-83.
- Calviño, P., y J.P. Monzon.** 2009. Farming systems of Argentina: Yield constraints and risk management. In: Sadras, V.O.; Calderini, D.F. *Crop physiology.* Elsevier. pp. 55-70.
- Cambardella, C.A., y E.T. Elliot.** 1992. Particulate soil organic matter. Changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci Soc Am J* 56:777-783.
- Caviglia, O.P., F.H. Andrade, y V.O. Sadras.** 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 Res.* 87(3):117-129.
- Caviglia, O.P. y F.H. Andrade.** 2010. Sustainable intensification of agriculture in the Argentinean Pampas: Capture and use efficiency of environmental resources. *The Am J Plant Sci Biotech.* 3 (Special Issue 1): 1-8.
- Cordone, G. y F. Martínez.** 2004. El monocultivo de soja y el déficit de nitrógeno. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 24:1-4.
- Dominguez, G.F., y G.A. Studdert.** 2006. Balance de carbono en un molisol bajo labranza convencional. Actas 20° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta-Jujuy, septiembre 2006. En CD.
- Fabrizzi, K.P., A. Morón, y F.O. García.** 2003. Soil carbon and nitrogen organic fractions in degraded vs. non-degraded Mollisols in Argentina. *Soil Sci Soc Am J.* 67:1831-1841.
- Genovese, M.F., H.E. Echeverría, G.A. Studdert, y H.E. Sainz Rosas.** 2009. Nitrógeno de amino-azúcares en suelos: calibración y relación con el nitrógeno incubado anaeróbico. *Ciencia del Suelo* 27:225-236.
- Guggenberger, G.; W. Zech, L. Haumaier, y B.T. Christensen.** 1995. Land use effects on the composition of organic matter in particle size separates of soil II. CPMAS and solution ¹³C NMR analysis. *European Journal of Soil Science.* 46:147-158.
- Kaspar, T.C., D.B. Jaynes, T.B. Parkin, T.B. Moorman, y J.W. Singer.** 2012. Effectiveness of oat and rye cover crops in reducing nitrate losses in drainage water. *Agr Water Manage.* 110: 25-33.
- Keeney, D.R.** 1982. Nitrogen-availability indexes. in: AL Page et al. (eds.) *Methods of soil analysis. Part 2, Chemical and microbiological properties.* Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, EEUU. pp. 711-733.
- Lavado, R.** 2006. La región Pampeana: Historia, características y uso de sus suelos. En: Álvarez R. (ed.) *Materia Orgánica "Valor Agronómico y Dinámica en Suelos Pampeanos"* Editorial Facultad de Agronomía, UBA. Buenos Aires, Argentina. pp. 1-11.
- LECO.** 2011. Organic application notes. [En línea]. (<http://www.leco.com/>). [consulta: septiembre 2011].
- MAGyP.** 2012. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Base de datos sistema integrado de información agropecuaria. [En línea] <<http://www.minagri.gob.ar>> [consulta: mayo 2012].
- Martínez, F.** 2002. La soja en la Región Pampeana. IDIA Año II N° 3.
- Martínez, J.P., P.A. Barbieri, H.R. Sainz Rosas, y H.E. Echeverría.** 2013. Inclusion of cover crops in

cropping sequences with soybean predominance in the southeast of the Humid Argentine Pampa. *The Open Agriculture Journal*. 7: 3-10. ISSN: 1874-3315.

Melgar, R., G. Vitti, y V. De Melo Benites. 2011. Soja en Latinoamérica. *IIP Boletín* 20. 179 p.

Milesi Delaye, L.A., A.B. Irizar, A.E. Andriulo, y B. Mary. 2013. Effect of continuous agriculture of grassland soils of the Argentine Rolling Pampa on soil organic carbon and nitrogen. *Appl. Environ. Soil Sci.* 2013 (id 487865):17.

Plante, A.F., R.T. Conant, C. E. Stewart, K. Paustian, y J. Six. 2006. Impact of Soil Texture on the Distribution of Soil Organic Matter in Physical and Chemical Fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:287-296

Restovich, S.B., A.E. Andriulo y S.I. Portela. 2012. Introduction of cover crops in a maize–soybean rotation of the Humid Pampas: Effect on nitrogen and water dynamics. *Field Crops Res.* 128: 62–70.

Ruffo, M.L., D.G. Bullock y G.A. Bollero. 2004. Soybean yield as affected by biomass and nitrogen uptake of cereal rye in winter cover crop rotations. *Agron J.* 96:800–805.

Sainju, U.M., B.P. Singh y W.F. Whitehead. 2002. Long-term effects of tillage, cover crops, and nitrogen fertilization on organic carbon and nitrogen concentrations in sandy loam soils in Georgia, USA. *Soil Till Res.* 63:167–179.

Salvagiotti, F., K.G. Cassman, J.E. Specht, D.T. Walters, A. Weiss y A. Dobermann. 2008. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Res.* 108:1-13.

SAS Institute. 1988. SAS/STAT User's guide. Statics version. 6.0. 3rd ed. SAS Institute, Cary, North Carolina, USA.

Soon, Y.K., A. Haq y M.A. Arshad. 2007. Sensitivity of nitrogen mineralization indicators to crop and soil management. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 38:2029-2043.

Six, J., C. Feller, K. Denef, S. M. Ogle, J.C. Moraes Sa y A. Albrecht. 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – Effects of no-tillage. *Agronomie* 22 (2002) 755-775.

Studdert, G.A. y H.E. Echeverría. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64:1496-1503.

Wyngaard, N. 2011. Efecto a largo plazo de la fertilización y los sistemas de labranza sobre las propiedades de un Argiudol y el rendimiento de maíz. Tesis Magister Scientiae. Facultad de Ciencias Agrarias Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce, Argentina. 68p.

Wyngaard, N., H.R. Sainz Rozas, H.E. Echeverría y G.A. Divito. 2012. Fertilization and tillage effects on soil properties and maize yield in a Southern Pampas Argiudoll. *Soil Till Res.* 119:22-30. ■

[volver al índice](#)

Productividad y consumo de agua de maíz tardío en el centro de San Luis (Argentina): Cambios provocados por la fertilización nitrogenada[†]

J.L. Mercou^{1,2,*} M.A. Ibarra^{1,2} y E.G. Jobbagy²

¹Chacra San Luis, AAPRESID; ²Grupo de Estudios Ambientales, Universidad Nacional de San Luis y CONICET, San Luis, Argentina.

*Contacto: jorgemercou@gmail.com

[†]Artículo publicado en *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*. International Plant Nutrition Institute. Diciembre 2014.

INTRODUCCIÓN

El avance y la consolidación de la frontera agrícola en el cordón semiárido central de Argentina son vigorosos en el centro de la provincia de San Luis. La producción de maíz, que ocupa la mitad del área agrícola de la provincia, enfrenta el desafío de obtener buenos rendimientos en seco, con un riesgo tolerable, en un ambiente con lluvias escasas y altamente variables (Magliano et al., en prensa). Al igual que otras regiones (Maddonni, 2012), las siembras tardías en la zona permiten aumentar la oferta hídrica porque: i) favorecen la recarga completa del perfil, y ii) ubican el periodo desde siembra a madurez fisiológica en una época del año con mayor nivel de precipitaciones. Sin embargo, como los suelos predominantes son de texturas arenosas y con bajo contenido de materia orgánica, es posible que la oferta de nitrógeno (N) sea escasa para el crecimiento del cultivo, afectando su capacidad para utilizar el agua y transformarla en rendimiento (Linscott et al., 1962; Singh et al., 1979).

Uno de los riesgos ambientales generados por el avance agrícola en el semiárido central de Argentina es desencadenado por la pérdida de agua en profundidad, y el ascenso freático y salinización/erosión que lo puede acompañar (Santoni et al., 2010; Contreras et al., 2013). La

elevada capacidad de transpirar, y sus raíces profundas, permiten a los montes nativos usar toda el agua de lluvia suprimiendo el drenaje profundo y favoreciendo la acumulación de sales por debajo de los primeros metros de suelo. El agua que pierde la agricultura en profundidad arrastra estas sales, eleva la napa freática y puede disparar procesos de salinización en la superficie conocidos, en otros continentes, como "dryland salinity" (Scanlon et al., 2007). En el pedemonte serrano, estos aumentos de recarga freática han desencadenado la aparición abrupta de nuevos ríos salobres (Contreras et al., 2013). Al favorecer la recarga del perfil, la siembra tardía aumenta el riesgo de recarga freática. En este trabajo evaluamos el cambio que produce la fertilización nitrogenada del maíz tardío en el consumo de agua y en sus efectos sobre la productividad en grano del agua ofrecida y sobre el drenaje profundo y recarga freática, considerando un amplio gradiente de precipitaciones medias y texturas de suelo en el centro de la provincia de San Luis (Argentina).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron cinco ensayos, en disposición de grandes franjas bajo condiciones de seco en campos del centro de San Luis (entre 33.18° y

Tabla 1. Descripción de los cinco sitios de ensayo. Textura Franca (Fr), Franco Arenosa (FrAr), Areno Franca (ArFr) y Arenosa (Ar). El antecesor centeno es un cultivo cosechado en la misma campaña que tuvo soja como antecesor.

		Sitios Experimentales				
		A	B	C	D	E
Lluvia histórica	mm año ⁻¹	800	700	600	500	400
Textura superficial		Fr	FrAr	FrAr	ArFr	Ar
MO (0-20 cm)	%	1.7	1.2	1.2	0.7	0.8
N-NO ₃ (0-60cm)	kg ha ⁻¹	54	28	49	38	21
Antecesor		Soja	Soja	Soja	Soja	Centeno
Fecha de siembra		28-Nov	01-Dic	03-Dic	28-Nov	11-Dic
Densidad	PI ha ⁻¹	56000	54000	54000	40000	36000

34.06° S y entre 65.77° a 66.17° W), denominados A, B, C, D y E, por su ubicación a lo largo de un gradiente de precipitación media anual (**Tabla 1**). En la campaña 2013/14 (base 1 de junio) recibieron 905, 791, 530, 548 y 615 mm, respectivamente, con una distribución irregular en el ciclo del cultivo (**Figura 1**). Los suelos fueron profundos con 45 a 90% de arena (0-200 cm) y 0.7 a 1.7 % de materia orgánica (**Tabla 1**). El maíz

se sembró entre el 28 de noviembre y el 12 de diciembre, procurando, y logrando, entre 36 000 y 56 000 plantas ha⁻¹ con híbridos de madurez relativa 118 a 122. El antecesor fue soja en todos los sitios excepto en el E, donde fue centeno. Se evaluó un testigo sin fertilizar (21- 54 kg N-nitrato ha⁻¹ en los primeros 60 cm del perfil, **Tabla 1**) y un tratamiento fertilizado a la siembra con urea incorporada (agregando 56-75 kg N ha⁻¹).

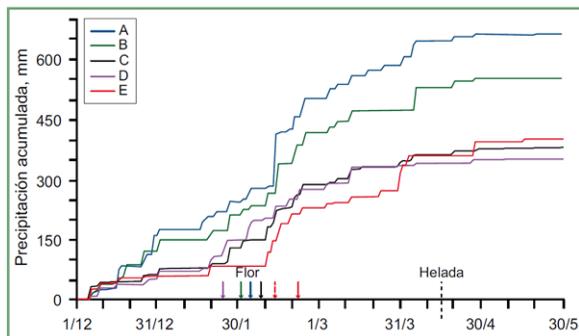


Figura 1. Distribución comparativa de las precipitaciones durante el ciclo del cultivo de maíz para los diferentes sitios bajo estudio (A, B, C, D, E).

Los tratamientos testigo y fertilizado contaron con dos y tres repeticiones, respectivamente, y cada unidades experimental cubría entre 0.07 a 0.29 ha. La siembra y cosecha fueron mecánicas, y el manejo fue igual al de un lote comercial, sin que los cultivos hayan sufrido daños por adversidades. La disponibilidad de agua útil se midió hasta dos metros de profundidad, cada 20 cm, en tres momentos del ciclo del cultivo de maíz: i) siembra, ii) cuaje de granos, y iii) madurez fisiológica (**Figura 2**). A partir de la textura y las mediciones en todo el ciclo se estimaron los límites hídricos en cada ensayo (**Figura 2**). En base

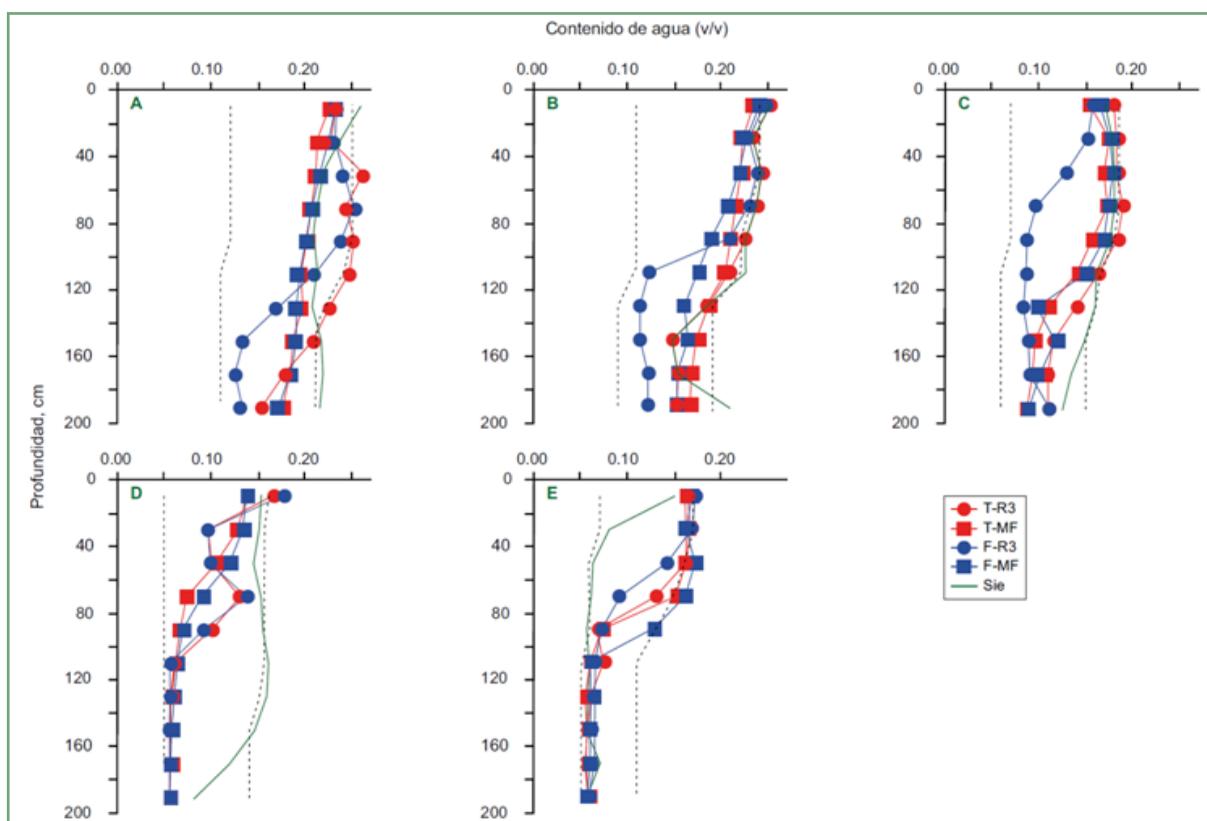


Figura 2. Contenido volumétrico de agua en el perfil de suelo para los tratamientos testigo (T) y fertilizado (F) en diferentes momentos del ciclo [Sie: siembra; R3: estadío de grano lechoso (12 al 28 de febrero); y MF: madurez fisiológica (14-16 de abril)] en los cinco sitios experimentales. Las líneas punteadas grises indican, para cada sitio, los límites hídricos de marchitez permanente (izquierda) y capacidad de campo (derecha).

a un balance hídrico diario, calculando lluvias efectivas con la aproximación de curva número y la demanda mediante la aproximación FAO-56 con un coeficiente de cultivo único y evapotranspiración (ETP) de Penman-Monteith (Allen et al., 1998), se estimó el drenaje profundo (pérdida de agua debajo de los 2 m). El consumo aparente se estimó como la suma de las lluvias en el ciclo (Figura 1), y la diferencia de contenido de agua entre siembra y madurez (Figura 2), menos el drenaje. La evapotranspiración real del cultivo (ETc) se obtuvo del mismo modo pero utilizando las lluvias efectivas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La fertilización con N aumentó el rendimiento en cuatro de los cinco ensayos (Figura 3). Al igual que en zonas húmedas (Otegui et al., 2002), el manejo adecuado de este nutriente modifica el resultado del cultivo en siembras tardías. Los rendimientos fluctuaron entre 1098 y 10 255 kg ha⁻¹. Los valores más bajos fueron en el sitio E, que se sembró con 29 mm de agua útil en todo el perfil (Figura 2), y que sufrió el más largo periodo sin lluvias en enero y principio de febrero, retrasando la floración alrededor de 10 días (datos no mostrados). Los otros cuatro ensayos partieron con el perfil casi lleno al momento de la siembra (89-96% del agua útil, (Figura 2). Los cultivos atravesaron un periodo con pocas lluvias hasta unos 10 días antes del segundo muestreo (12-28 de febrero), generando un consumo importante del agua del suelo en el segundo metro (Figura 2, muestreo de cuaje).

La fertilización con N redujo la cantidad de agua en el suelo al momento del cuaje (Figura 2), evitando las pérdidas por drenaje profundo que se

produjeron en el llenado de granos cuando no se fertilizó (Tabla 2, Figura 2). En los ensayos A, B y C, las parcelas fertilizadas tuvieron, respectivamente, 53, 59 y 94 mm menos de agua en el perfil alrededor del cuaje de granos. En los otros sitios, la diferencia fue inferior a 10 mm. En madurez, en general los perfiles estaban más húmedos, consecuencia de las elevadas lluvias hacia fin del ciclo (Figura 1), y no hubo diferencias importantes entre los tratamientos (Figura 2). Entre ambos muestreos, en los testigos se estimó una pérdida debajo de los dos metros de 53 y 18 mm, en los sitios A y C. En cambio, en las parcelas fertilizadas, el perfil previamente más vacío impidió que ocurra drenaje (Tabla 2). Los eventos de pérdida en profundidad fueron, según sugiere el balance diario, hacia fin de febrero, en los dos ensayos, y también a principios de abril en el ensayo A.

La productividad en grano del agua ofrecida en el ciclo para el cultivo de maíz tardío aumentó con la fertilización, por una combinación de mayor evapotranspiración con reducción del drenaje, y de mayor eficiencia de uso del agua evapotranspirada (Tabla 2). La evapotranspiración aumentó

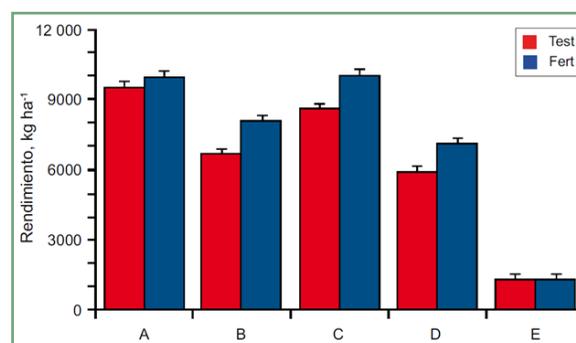


Figura 3. Rendimiento (kg ha⁻¹) de maíz en los cinco ensayos (A-E) en las parcelas testigo (columnas rojas) y fertilizadas (columnas azules). La barra indica el error estándar en cada ensayo.

Tabla 2. Flujos de agua en el ciclo del cultivo (mm), magnitud de la ETc respecto de lluvia anual (PPAnual) y la oferta en el ciclo; y productividad en grano de la oferta de agua consumida y evapotranspirada (ETc) para los tratamientos testigo y Fertilizado de la media y desvío de los tratamiento A, B, C y D. Por separado se muestran los resultados del ensayo E, para ambos tratamientos juntos.

	Flujo de agua en el ciclo				ETc relativa		Productividad		
	Consumo	ETc	Drenaje	Esco-rrentía	PP Anual	Of. Ciclo	Of.Ciclo	Consu-mo	ETc
	mm				%		kg grano mm ⁻¹		
Testigo	504±136	389±82	18±25	115±65	57±12	60±11	12±3	16±6	20±6
Fertiliza-do	521±158	406±100	0	115±65	59±10	62±9	14±4	18±7	22±7
Sitio E	255±/-12	196±12	0	59	32±2	56±4	4±0.1	5±0.3	7±0.4

50 y 22 mm en los sitios A y B, reduciendo la pérdida de agua en el primero y dejando el perfil un poco más seco en el segundo (**Figura 2**). En C, aunque el mayor consumo hasta el cuaje evitó el drenaje, las menores lluvias hacia el fin del llenado hicieron que el testigo pueda consumir más porque tenía más agua disponible en el perfil (**Figura 2**). La eficiencia en el uso del agua evapotranspirada aumentó 13-22% en B, C y D, y cayó un 5% en A. En el sitio E, el crecimiento de los cultivos fue muy pobre, generando valores muy distintos de los otros sitios y sin diferencias importantes entre tratamientos.

CONCLUSIONES

El uso de siembras tardías en el cultivo de maíz contribuye a la consolidación de los planteos agrícolas del cordón semiárido del centro de Argentina. La fertilización nitrogenada permite aumentar la productividad de las escasas y variables lluvias en la región, mejorando el promedio y reduciendo el riesgo económico. Además, el mayor uso del agua en profundidad, reduce el drenaje profundo y la recarga de las napas, uno de los riesgos ambientales generados por la agricultura en estos ambientes.

AGRADECIMIENTOS

Los productores del proyecto Chacra San Luis (AAPRESID) financiaron el trabajo de Martín Ibarra y la ejecución de los ensayos. El trabajo de Jorge Mercau fue parcialmente financiado por el International Development Research Center (IDRC, Canadá) y el Inter-American Institute for Global Change Research (IAI, SGP-CRA 2031 and CRN 3095), que también financiaron los análisis de agua en el laboratorio del GEA.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R., L.S. Pereira, D. Raes, y M. Smith.** 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome.
- Contreras, S., C.S. Santoni, y E.G. Jobbágy.** 2012. Abrupt watercourse formation in a semiarid sedimentary landscape of central Argentina: the roles of forest clearing, rainfall variability and seismic activity. *Ecohydrology*, 6:794-805.
- Linscott, D.L., R.L. Fox, y R.C. Lipps.** 1962. Corn root distribution and moisture extraction in relation to

nitrogen fertilization and soil properties. *Agron. J.* 54: 185- 189.

Magliano, P.N., R.J. Fernández, J.L. Mercau, y E.G. Jobbágy. En prensa. Precipitation event distribution in central Argentina: Spatial and temporal patterns. *Ecohydrology*.

Maddoni, G.A. 2012. Analysis of climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina – a probabilistic approach. *Theor. Appl. Climatol.* 107:325-345.

Otegui, M.E., J.L. Mercau, y F.J. Menéndez. 2002. Estrategias de manejo para la producción de maíz tardío y de segunda. En: E.H. Satorre (Ed.), *Guía Dekalb del cultivo de Maíz*. ISBN 987-20358-0-6. pp 171-184. Disponible en <https://sites.google.com/a/agro.uba.ar/granero/>

Santoni, C.S., E.G. Jobbágy, y S. Contreras. 2010. Vadose zone transport in dry forests of central Argentina: role of land use. *Water Resources Research* 46: W10541. DOI: 10.1029/2009WR008784.

Scanlon, B.R., I. Jolly, M. Sophocleus, y L. Zhang. 2007. Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality. *Water Resources Research*. Vol. 43 (3) March 2007. doi:10.1029/2006WR005486: 1-18.

Singh, R., B. Dass, N. Singh, e Y. Singh. 1979. Effect of n fertilization on yield and moisture extraction by rainfed maize as affected by soil type and rainfall in Punjab, India. *Field Crop Research*, 2:109-115. ■

[volver al índice](#)

Análisis económico de rotaciones y fertilización en soja

Fernando H. Míguez e Inés C. Davèrède*

Facultad de Ciencias Agrarias, UCA

*Contacto: inesdaverede@gmail.com

Las condiciones económicas y de mercado en los últimos años han inducido a los productores agrícolas a aumentar la proporción de soja en la rotación. Actualmente, más del 60% del área agrícola se siembra con soja, su monocultivo está generalizado en muchas regiones. La soja ha sido el cultivo más rentable (calculado por peso invertido), de menor costo de producción por hectárea, y a pesar de los altos derechos de exportación, su comercialización ha sido siempre fluida.

La soja es el cultivo que más se siembra y menos se fertiliza, exportando más nutrientes de los que se reponen (Álvarez et al., 1995; Cruzate y Casas, 2012; García y González San Juan, 2013). El monocultivo de soja aporta poca biomasa al suelo en comparación a otros cultivos como el sorgo y el maíz y, por lo tanto, el balance de materia orgánica (MO) del monocultivo, aun en siembra directa, es negativo (Havlin et al., 1990; Novelli et al., 2014). Por otro lado, la escasa biomasa aportada por la soja genera poca cobertura del suelo y el suelo se torna susceptible a la erosión eólica e hídrica, provocando pérdidas de suelo y mayor escurrimiento superficial (Darder et al., 2014).

Una rotación balanceada en siembra directa que incluya gramíneas (maíz, sorgo, trigo, cebada) presenta un balance más favorable de MO (Novelli et al., 2014) y resulta más rentable que el monocultivo de soja –medida en un período de 5 años-. Su rentabilidad es más estable al diversificar en el año los períodos críticos para la definición del rendimiento de los cultivos que se incluyan. Se diversifican también los riesgos de precios y mercados. Asimismo, facilita el control

de malezas, la necesaria rotación de herbicidas y momentos de aplicación evita la proliferación de malezas tolerantes y resistentes al glifosato. Si se realiza una rotación balanceada con reposición de nutrientes, es muy probable que se pueda negociar un arrendamiento a largo plazo por un menor valor.

Varias experiencias han documentado que el cultivo de soja rinde más si el antecesor es maíz o sorgo, que si es sembrada sobre rastrojo de soja (Felizia et al., 1994; Lauer et al., 1997). Baciagaluppo et al. (2009) observaron un aumento del rendimiento del 10% en rotaciones que incluían gramíneas en comparación con monocultivo de soja. Ese aumento en el rendimiento es generado por la mayor disponibilidad de agua a la siembra, el mayor tenor de MO superficial, la mejor estructura del suelo, la mayor eficiencia en captar el agua de lluvia y el control de la evaporación por la cobertura del rastrojo, además de la menor presión de enfermedades causadas por parásitos necrotróficos. Todo esto genera una mayor eficiencia en el uso del agua y mayor rendimiento.

En la **Tabla 1** se calcula el margen bruto de una rotación balanceada comparado con el monocultivo de soja. Aun con los bajos precios actuales y las restricciones a la exportación de maíz, con el diferencial de rendimiento, ambos márgenes son similares. En el análisis comparativo de rentabilidad entre una rotación balanceada y el monocultivo se debería incluir el costo de la pérdida de MO del suelo provocada por el monocultivo contra la ganancia en la rotación. La pérdida de fertilidad física –menor retención de agua, mayor escorrentía,

Tabla 1. Comparación del Margen Bruto de soja en monocultivo vs una rotación balanceada, precios y costos de marzo 2015, según modelos técnicos de Revista Agromercado (2014).

Actividad	Maíz	Soja 1a	Cebada /Soja 2da	Monocultivo soja
Proporción, %	33	33	33	100
Rendimiento, kg ha ⁻¹	10000	4200	4500/3000	3800
Precio, US\$ t ⁻¹	138	235	160/235	235
Costos Directos, US\$ ha ⁻¹	507	280	386/246	280
Margen Bruto, US\$ ha ⁻¹	396	491	421	417
Margen Bruto Rotación, US\$ ha ⁻¹	437			

menor acumulación de agua en el barbecho y peor estructuración- es en gran medida responsable, y queda valorizada, por el menor rendimiento de la soja en monocultivo. Recordemos que el balance de MO depende del coeficiente de mineralización, que a su vez está asociado a la temperatura, por lo que el efecto del monocultivo sobre el suelo es mucho más acentuado hacia el norte del país. En zonas húmedas, el riesgo de erosión hídrica por falta de cobertura vegetal también se magnifica. Una rotación balanceada aprovecha mejor el total de precipitaciones anuales y si se hace a escala regional, puede paliar el problema de inundaciones en años húmedos. Deberíamos producir la mayor cantidad de biomasa vegetal por milímetro de agua disponible.

¿Por qué se realiza monocultivo de soja con las desventajas que presenta?

Uno de los motivos de la falta de percepción del productor es que normalmente la variación interanual de los rendimientos supera a la diferencia por efecto del antecesor. Esto quiere decir que si el año es bueno, el rendimiento de la soja superará al año anterior enmascarando el efecto del monocultivo. La mejora en la genética y en la tecnología del cultivo también enmascara este efecto. Otro motivo es que la mayoría de los productores medianos y chicos no guardan información detallada de las campañas pasadas y tienen recuerdos sesgados de los resultados. Para evidenciar la diferencia debida al antecesor, es necesario comparar varios lotes para una misma campaña y con un manejo similar, sembrados sobre soja versus maíz o sorgo, y muchos productores no cuentan con esta información. Tampoco debemos olvidarnos que la soja es el cultivo más económico de implantar, se invierte aproximadamente la mitad para sembrar soja que para sembrar maíz, por lo tanto con el mismo capital disponible un arrendatario sembrará más hectáreas si hace monocultivo. Además, la soja RR es un cultivo muy plástico, compensa fallas en la densidad de siembra a través de sus ramificaciones, tiene una amplia ventana de fecha de siembra, tolera una amplia defoliación por isocas, fija nitrógeno (N) del aire y presenta niveles críticos de fósforo (P) extractable del suelo (P-Bray) menores que los de otros cultivos por lo cual se adapta a suelos más pobres en este nutriente. Por otro lado, como el 60% de las siembras se

hacen en campos alquilados, el arrendatario en general no se preocupa por el mantenimiento del P del suelo y el propietario que arrienda no es consciente del deterioro de sus suelos.

¿Es rentable fertilizar la soja?

La agricultura moderna tiene un paquete tecnológico que incluye -y hace necesaria- la aplicación de diversos insumos para que la variedad sembrada exprese su potencial genético. La mayoría de los productores no dudan en controlar malezas, plagas o enfermedades ya que sus efectos sobre las plantas y el rendimiento son evidentes. Sin embargo, hay una percepción de que la fertilización es sustituible o postergable. Ello es así en parte porque el suelo puede proveer parte los nutrientes necesarios para el cultivo, aunque en la gran mayoría de los casos, no en cantidad suficiente para lograr elevados rendimientos.

Se analizará la conveniencia de fertilizar con P, ya que es el nutriente con una respuesta en rendimiento más probable y sobre el que hay más ensayos. Luego de un relevamiento de los niveles de macronutrientes en la región pampeana realizado por INTA y Fertilizar Asociación Civil, Sainz Rozas et al. (2014) observaron que los valores más bajos de P-Bray ($<15 \text{ mg kg}^{-1}$) se determinaron en la provincia de Buenos Aires, sur de Santa Fe y sur de Córdoba. Estos autores concluyeron que el nivel actual de P-Bray en los suelos de esta vasta región podría ser limitante o encontrarse muy cerca del umbral de respuesta.

Para medir la respuesta económica a la fertilización fosforada, es necesario calcular cuántos kilos de soja (puestos en el campo) se necesitan para pagar el fertilizante y su aplicación. Por tanto, al precio disponible -o mejor al esperado a cosecha- hay que restarle los gastos de cosecha y comercialización, entre los que incide de manera muy significativa el flete a puerto. Al precio actual del fertilizante y al precio esperado a cosecha de soja (al momento de escribir esta nota, la soja Mayo 2016 cotiza en Chicago prácticamente igual a Mayo 2015), en un campo situado a 150 km del puerto se necesitan 347 kilos de soja para pagar 100 kg de superfosfato triple (SPT) más su aplicación; y se necesitan 394 kilos de soja si el campo está situado a 350 km del puerto.

Si bien la relación insumo/producto se ha deteriorado en los últimos meses, por la baja en el precio de la soja, no difiere mucho de la relación en campañas anteriores (**Figura 1**).

Existen varios criterios al momento de decidir una fertilización. Uno puede ser el de obtener la máxima rentabilidad por la inversión realizada, con lo que la dosis será baja para maximizar la respuesta por unidad de fertilizante aplicado. Otro criterio, más racional, es reponer lo que se llevan los granos de modo de no empobrecer el suelo. El tercero es de enriquecimiento, es decir recuperar un determinado nivel del nutriente en el suelo. El cálculo económico lo hicimos con la aplicación de 90 kg ha⁻¹ de SPT (18 kg de P), que es aproximadamente lo que extrae un cultivo de soja con rendimiento de 44 q ha⁻¹ (Bermúdez et al., 2014), por lo que sería una dosis de reposición. Según numerosos ensayos en Santa Fe y norte de Buenos Aires (Gutiérrez Boem et al., 2006; Fontanetto et al., 2008; Bermúdez et al., 2014), en suelos con P Bray menor a 10 ppm, se puede esperar una respuesta aproximada a 500 kg ha⁻¹ para esa dosis. Cuanto menor sea la disponibilidad de P en el suelo, la respuesta será más probable y de mayor magnitud. En nuestra red de ensayos de 2013-2014, hemos obtenido respuestas de 363 kg ha⁻¹ en el centro de la provincia de Buenos Aires

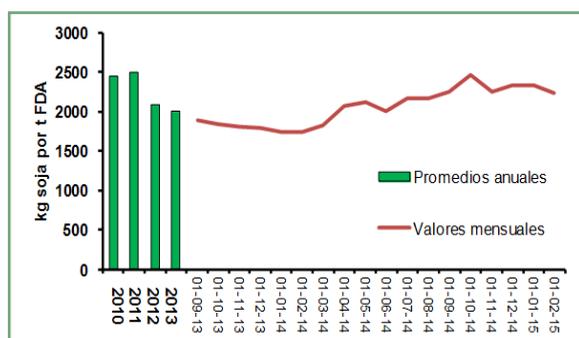


Figura 1. Kilogramos de grano de soja necesarios para comprar 1 t de fosfato diamónico en función del tiempo. Fuente: Base de datos Revista Agromercado (2014).

y Gualeguaychú, con valores de P-Bray menores a 9 mg kg⁻¹.

Con los valores actuales, para una dosis de reposición y las respuestas esperables, la rentabilidad de la práctica se ubica entre \$ 1.7 y \$ 2 por peso invertido. No interesa solamente la rentabilidad de la práctica en sí, sino también que el aumento en el rendimiento permita reducir el costo por tonelada producida al diluir los costos fijos de la siembra. El costo de la semilla, de las labores y demás insumos, y en especial del arrendamiento (a quintales fijos), es independiente del rendimiento obtenido. Con el aumento de costos y la baja en el precio de la soja, el rendimiento de indiferencia –aquel necesario para no perder plata– es cada vez más alto. En la **Tabla 2** se calcula el Margen Bruto esperado en 4 escenarios para un campo en la zona núcleo: campo propio y arrendado, con y sin fertilizar con 90 kg ha⁻¹ de SPT. Se supone que el campo se arrienda pagando 1400 kg ha⁻¹ al valor actual de la soja (esperado a Mayo 2015) y que el arrendatario tiene un costo operativo de 28 US\$ ha⁻¹ más el 3% del Ingreso Neto.

Resulta claro que un rendimiento de 3600 kg ha⁻¹ no es suficiente para cubrir los costos en un campo arrendado y que el aumento en el rendimiento esperado por la fertilización permite no perder en campo arrendado y mejorar la rentabilidad en campo propio.

La única manera de obtener resultados positivos en el contexto actual es con rendimientos muy altos; para lograrlos debemos fertilizar al cultivo en forma suficiente para que exprese todo su potencial genético. Debemos entender al cultivo como un todo, conocer sus necesidades, contar con un análisis de suelo que nos indique la disponibilidad de nutrientes, realizar un diagnóstico

Tabla 2. Margen bruto esperado, en campo propio y arrendado; con y sin fertilización con 90 kg ha⁻¹ de SPT. Fuente: Elaborado en base a modelos técnicos Revista Agromercado (2014) y Márgenes Agropecuarios (2015).

	Sin fertilizar		Fertilizado	
	Propio	Arrendado	Propio	Arrendado
Precio esperado, US\$ t ⁻¹	235	235	235	235
Rendimiento, kg ha ⁻¹	3600	3600	4100	4100
Cosecha y comercialización, %	29	29	29	29
Ingreso Neto, US\$ ha ⁻¹	601	601	684	684
Gastos directos, US\$ ha ⁻¹	243	289	294	343
Arrendamiento 1400 kg		329		329
Margen Bruto, US\$ ha ⁻¹	358	-17	390	12

apropiado y aplicar los insumos de la manera más eficiente que nos sea posible.

¿Cómo se puede revertir la falta de rotación y reposición de nutrientes?

La sostenibilidad del sistema productivo pasa indudablemente por una rotación balanceada. Para favorecerla, se debería liberar la comercialización de los granos –trigo y maíz principalmente– y eliminar o al menos disminuir significativamente los derechos de exportación de los cereales y el girasol. Se debería también disminuir paulatinamente los derechos de exportación de soja. El diferencial impositivo estimulará la inclusión de gramíneas en la rotación al mejorar su rentabilidad. La reposición de nutrientes podría también estimularse mediante la doble desgravación en el cálculo del impuesto a las ganancias de la inversión en fertilizantes y en el asesoramiento agronómico.

Aunque resulte prematuro especular con la política económica que implementará el próximo gobierno, puede razonablemente esperarse que no aumente la presión impositiva y que se corrija el atraso cambiario (al momento de escribir esta nota el dólar soja, neto de retenciones, vale \$ 5.65). Puede ser un muy buen negocio transformar los pesos disponibles en soja futura, mediante la compra de insumos para el cultivo.

BIBLIOGRAFÍA

Álvarez, R., J.H. Lemcoff y A.H. Merzari. 1995. Balance de nitrógeno en un suelo cultivado con soja. *Ciencia del Suelo* 13:38-40

Bacigaluppo, S., M. Bodrero y F. Salvagiotti. 2009. Producción de soja en rotación vs monocultivo en suelos con historia agrícola prolongada. *EEA-INTA Oliveros. Para Mejorar la Producción* 42:53-55

Bermúdez, M., M. Díaz-Zorita, G. Espósito, G. Ferraris, G. Gerster, M. Saks, F. Salvagiotti y L. Ventimiglia. 2014. Fertilización con fósforo en secuencias continuas de soja *Actas XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, AACCS, Bahía Blanca.*

Cruzate, A.G y R. R. Casas. 2012. Extracción y balance de nutrientes en los suelos agrícolas de la Argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica.* 6:7-14

Darder, L., M. Castiglioni; C. Sasal, A. Andriulo, L. Garcia, J. Dalpiaz, J. Torti, D. Colombini y F. Villalba. 2014. Pérdida de agua, sedimentos y nutrientes en argiudoles con diferentes rotaciones de cultivos. *Actas XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, AACCS, Bahía Blanca.*

Felizia, J.C., C.A. Rivas Fanconi, J.A. Pabón y W. Hofer, 1994. Influencia del maíz y sorgo granífero sobre el rendimiento de la soja en suelos degradados del área de influencia de la AER Roldán. En: *Rotaciones para Producir Rastrojos*, pp. 23-25. Proyecto PAC II, Serie Agricultura Sostenible N° 2, INTA.

Fontanetto, H., O. Keller, O. Giailevra, L. Belotti, y C. Negro. 2008. Fertilización fosfatada del cultivo de soja en suelos de la región central de Santa Fe: Respuesta física del cultivo, eficiencia de uso del P y niveles críticos en el suelo. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica.*39:

García, F.O., y M.F. González San Juan. 2013. La nutrición de suelos y cultivos y el balance de nutrientes: ¿Cómo estamos? *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica.* 9:1-7.

Gutiérrez Boem, F., Prystupa, P y Alvarez, C.R. 2006. Comparación de dos redes de ensayos de fertilización fosforada de soja en la región pampeana. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 31.

Havlin, J.L, D.E. Kissel, L.D. Maddux, M.M. Claassen y J.H. Long. 1990. Crop Rotation and Tillage Effects on Soil Organic Carbon and Nitrogen. *Soil Science Society of America Journal* 54:448-452

Lauer, J., P. Porter, y E. Oplinger. 1997. The corn and soybean rotation effect. *Field Crops* 27.426, 28.426-14

Novelli, L.E., V.C. Gregorutti, O.P. Caviglia, y R.J.M. **Melchiori.** 2014. Simulación del carbono orgánico del suelo en diferentes secuencias de cultivos. *Actas XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, AACCS, Bahía Blanca.*

Revista Agromercado. 2014. Wilde, Buenos Aires. www.agromercado.com.ar

Revista Márgenes Agropecuarios. 2015. Ciudad de Buenos Aires. www.margenes.com.ar

Sainz Rozas, H.R., H. E. Echeverría, P.A. Barbieri y M. Eyherabide. 2014. Relevamiento y mapeo de la fertilidad en suelos agrícolas de la región pampeana argentina. *Revista Fertilizar* 29:4-8

[volver al índice](#)

Dosis y momento de aplicación de fósforo por zonas de manejo en maíces tardíos del sur de Córdoba

R. Naville*, C. Cerliani, G. Balboa, G. Martínez Bologna, y G. Espósito

Facultad de Agronomía y Veterinaria, Univ. Nac. de Río Cuarto

*Contacto: rafael_naville@hotmail.com; Rioja 1280 (5800) Río Cuarto, Córdoba

INTRODUCCIÓN

La región Pampeana Argentina ha sufrido un progresivo deterioro en la fertilidad de sus suelos a lo largo de su historia agrícola. Para los rendimientos obtenidos, la extracción realizada por los cultivos de grano, según García (2000) arrojan un balance de nutrientes en términos físicos y económicos negativo. Este resultado adquiere singular importancia en el caso del fósforo (P), ya que prácticamente la fertilización es su única vía de entrada al sistema (Vázquez, 2002). Adicionalmente, es un nutriente de elevada residualidad (Berardo, 2003), y baja eficiencia de recuperación cuando es agregado vía fertilización (Gutiérrez Boem et al., 2002).

Los suelos de la región Pampeana, presentan diferencias marcadas en cuanto a sus propiedades físicas y químicas (Alesso et al., 2012). Por esta razón, se considera que para ser eficientes en el manejo de los recursos y producir a gran escala, es necesario caracterizar ambientes dentro de un lote o un establecimiento. La Agricultura de precisión (AP) contribuye de diversas maneras a dicha eficiencia y a la sustentabilidad de la agricultura (Bongiovanni, 2001).

La fertilización con dosis variables de N es una de las aplicaciones que más ha despertado interés a nivel productivo, comercial y de investigación. Por el contrario, la aplicación de P tradicionalmente se realiza con una dosis única y uniforme en todo el lote. Considerando la alta variabilidad de P que se puede encontrar en la mayoría de los suelos agrícolas, las aplicaciones uniformes pueden tender a sobre-fertilizar algunas áreas y sub-fertilizar otras (Bermudez, 2011).

En la actualidad existen diversos trabajos de la respuesta del cultivo de maíz a fertilización fosforada a escala de lote (Andrade et al., 1996; Fontanetto, 1993; García et al., 1997; Melgar y Caamaño, 1997; Gutiérrez Boem et al., 2010; Ferraris et al., 2008) pero es escasa la información disponible a escala sitio específico. Por otro lado considerando el creciente interés en técnicas de manejo de cultivo para “maíces tardíos”, es

necesario incrementar los estudios de respuesta al P en siembras tardías (Bert y Satorre, 2012).

Finalmente, debido a la importancia de generar información actualizada sobre el cultivo de maíz en la región de Río Cuarto, se plantea esta línea de estudio con el objetivo de evaluar la respuesta del maíz tardío a la aplicación de P en distintos momentos y por zonas de manejo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron dos experimentos en la campaña 2012-13, uno se ubicó en cercanías de la localidad de Chaján (Córdoba) sobre un lote con relieve plano con suelo serie El Yará; el otro se condujo en cercanías de la localidad de Cuatro Vientos (Córdoba) sobre un lote con relieve ondulado con suelo serie La Aguada en la loma y La Invernada en el bajo. La siembra de los ensayos se realizó a mediados del mes de diciembre en secano, sobre un antecesor de soja de primera, bajo siembra directa con surcos distanciados a 0.525 m y densidad de 54 000 pl ha⁻¹. utilizando el híbrido DK 190 MG RR2 en ambos sitios. Los cultivos se mantuvieron libre de plagas, malezas y enfermedades. El diseño experimental fue en parcelas divididas, donde el factor principal fue la dosis de P en voleo anticipado (0 y 30 kg ha⁻¹ P), y el factor secundario fue la dosis de P a la siembra (0,16, 32 y 48 kg P ha⁻¹) aplicada debajo y al costado de la semilla, ambos casos bajo la forma de fosfato diamónico (FDA, 18-20-0). Cada tratamiento se dispuso, cruzando zonas de manejo (ZM), de 8.4 metros de ancho por 720 m de largo. Todos los tratamientos fueron fertilizados con 50 kg ha⁻¹ de N como nitrato de amonio calcáreo (CAN, 27-0-0) en el estadio V6 (Ritchie y Hanway, 1982).

De acuerdo a lo propuesto por Inman et al. (2005) el ajuste de las dosis económicamente óptima puede ser determinado por zonas de manejo sectorizadas mediante análisis de la productividad espacial. Por ese motivo, se realizó una zonificación ambiental a nivel de lote en ZM, empleando para ello mapas de rendimiento de campañas

anteriores. La zonificación se realizó empleando el programa de computación Management Zone Analyst (MZA, Mizzou-ARS, 2000).

En cada lote elegido para realizar el ensayo, se tomaron muestras de suelo, dirigidas en cada ZM. Los muestreos se realizaron previo al momento en que se voló el P, a las profundidades de 0-20 cm. En cada muestra se evaluó P extractable (Bray y Kurtz, 1945) y zinc (Zn) extractable (DTPA).

Las franjas se recolectaron con una cosechadora con monitor de rendimiento de cultivos y capacidad de georeferenciación mediante GPS, con la cual se elaboró el mapa de rendimiento, corregido a humedad comercial, de cada una de las franjas. Posteriormente, estos mapas de rendimiento se procesaron mediante el programa Quantum Gis Wroclaw (Quantum GIS Development Team, 2011).

Finalmente, el análisis estadístico del factor principal se realizó a través de un modelo que considera la variabilidad espacial mediante una función exponencial isotrópica, realizando la estimación de los parámetros por modelos lineales generales y mixtos. Para el análisis estadístico del factor secundario se utilizó el modelo de econometría espacial, que considera la estructura espacial de los datos (autocorrelación espacial y heterocedasticidad) en los modelos de regresión (Anselin, 1999). El análisis de regresión se realizó con una aplicación especializada para el trabajo con datos espaciales georeferenciados llamado OpenGeoDa 0.9.8.8 (GeoDa Center for Geospatial Analysis and Computation, Arizona State University.).

El modelo denominado de error espacial autoregresivo (SAR), utiliza la metodología de máxima verosimilitud para la determinación de los campos de interés y parámetros estadísticos. Dicho modelo asume que la variable dependiente no está correlacionada por sí misma, sino que es el error de muestreo aleatorio el que está correlacionado. Matemáticamente se expresa según la Ecuación [1]:

$$Y=X\beta+\varepsilon \quad [\text{Ec. 1}]$$

donde Y es el vector (n por 1) de observaciones de la variable rendimiento, X es la matriz de observaciones de las variables independientes (dosis de FDA y ZM), β es el vector de parámetros estimados, y ε es el término de error espacial, obtenido mediante la Ecuación [2]:

$$\varepsilon=\lambda W\varepsilon+\mu \quad [\text{Ec. 2}]$$

donde μ es el error de muestreo aleatorio que sigue una especificación autoregresiva espacial (SAR) con un coeficiente autoregresivo λ (lambda), corregido también por la matriz de ponderadores espaciales (W).

La respuesta del maíz al P se modeló como un polinomio múltiple de segundo grado por cada ZM (Ecuación [3]) y para cada momento de fertilización (Ecuación [4]).

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 P_f + \beta_2 P_f^2 + \beta_3 ZM + \beta_4 P_f \times ZM + \beta_5 P^2 \times ZM + \varepsilon_{ij} \quad [\text{Ec. 3}]$$

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 P_f + \beta_2 P_f^2 + \beta_3 V + \beta_4 P_f \times V + \beta_5 P^2 \times V + \varepsilon_{ij} \quad [\text{Ec. 4}]$$

donde Y_{ij} es el rendimiento del maíz (kg ha^{-1}) por cada punto ij del monitor de rendimiento, β_0 , β_1 , β_2 , β_3 , β_4 y β_5 , son los parámetros de la ecuación de regresión, P_f es la dosis de FDA (kg ha^{-1}), ZM y V se refieren a las variables "dummy" para cada zona de manejo y cada momento de fertilización respectivamente, y ε_{ij} es el término de error de la regresión por cada ubicación (Gregoret et al., 2011).

Para obtener en cada ZM y cada momento de fertilización la dosis óptima de FDA o la cantidad del nutriente necesario para alcanzar el máximo retorno económico a la fertilización con P (DOEP), se realizó una optimización tradicional de las ecuaciones [3] y [4] según Dillon y Anderson (1990), dando como resultado las Ecuaciones [5] y [6]:

$$DOEP = \frac{\left(\frac{P_p}{P_{maiz}}\right) - \beta_1 ZM}{2\beta_2 ZM} \quad [\text{Ec. 5}]$$

$$DOEP = \frac{\left(\frac{P_p}{P_{maiz}}\right) - \beta_1 V}{2\beta_2 V} \quad [\text{Ec. 6}]$$

Donde, P_{maiz} es el precio del maíz a obtener por un productor agrícola de la zona de Río Cuarto al momento de cosecha según cotización de la Bolsa de Cereales de Rosario, estimado en $0.115 \text{ US\$ kg}^{-1}$, P_p es el precio del FDA puesto en campo según precio comercial de la zona de Río Cuarto, estimado en $0.74 \text{ US\$ kg}^{-1}$. DOEP es la dosis óptima económica de P según ZM. La

relación de precios entonces quedó establecida en 6.43 kg de maíz para comprar 1 kg de producto FDA (equivalente a 32.15 kg de maíz para comprar 1 kg de P elemento).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Zonas de manejo

Mediante la zonificación realizada se establecieron dos zonas de manejo claramente diferenciadas en ambos sitios experimentales (**Figura 1**), alta producción (AP) y baja producción (BP). El muestreo de suelos indicó que en Chaján el P extractable (0-20 cm) fue de 7.35 y 11.25 mg kg⁻¹ y el nivel de Zn fue 0.18 y 0,22 mg kg⁻¹. en AP y BP respectivamente. En Cuatro Vientos el análisis de suelo indicó un P extractable de 9.35 y 5.90 mg kg⁻¹ y Zn de 0.93 y 0.67 mg kg⁻¹ en AP y BP respectivamente. Estos resultados indican que la disponibilidad de P y Zn es muy baja en ambos sitios y ZM, principalmente el Zn en Chaján.

No obstante, para los ensayos realizados en este estudio no se detectó efecto de la ZM sobre el rendimiento de maíz (**Tabla 1**, significancia de los parámetros β_3 , β_4 y β_5), esto podría explicarse por la fecha de siembra empleada ya que estudios previos realizados en la región indican que el efecto que produce las ZM sobre el rendimiento solo se detecta en siembras tempranas (Espósito et al., 2012; Martínez Bologna et al., 2014; Cerliani et al., 2014).

Efecto de la fertilización fosforada sobre el rendimiento de maíz.

En ambos sitios experimentales se observó respuesta a la aplicación de P independientemente del momento y forma de aplicación (**Tabla 2**). Este tipo de respuesta varió en función de los distintos sitios y formas de aplicación del fertilizante fosforado (**Figura 2 a y b**).

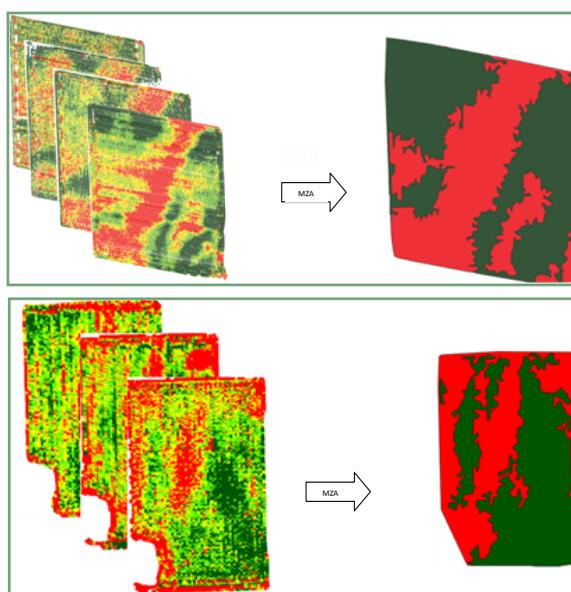


Figura 1. Mapas de Rendimiento (izquierda) y Zonificación mediante MZA (derecha) de los sitios Cuatro Vientos (arriba) y Chaján (abajo).

Tabla 1. Parámetros obtenidos del análisis estadístico de cada ensayo en los dos sitios para verificar la respuesta a ZM

	Chaján				Cuatro Vientos			
	Voleado		Bandas		Voleado		Bandas	
	Parámetro	SE	Parámetro	SE	Parámetro	SE	Parámetro	SE
β_0	7993.77	**	6952.86	**	6995.57	**	6679.9	**
β_1P	-3.58	ns	0.941	ns	15.52	**	5.292	*
β_2P^2	0.0079	Ns	-0.017	*	-0.053	**	-0.0061	ns
β_3ZM	82.77	Ns	-29.67	ns	3.819	ns	163.89	ns
β_4ZMP	0.7	ns	-0.128	ns	0.769	ns	-0.429	ns
β_5ZMP^2	-0.006	ns	-0.001	ns	-0.004	ns	0.0001	ns
Lambda	0.7	**	0.899	**	0.92	**	0.86	**
R ²	0.6		0.83		0.929		0.78	

β_0 , β_1 , β_2 , parámetros medios de la ecuación de regresión 3. β_3 , β_4 y β_5 , corrimiento de los parámetros para cada zona de manejo. SE, nivel de significancia estadística. * y **, diferencias estadísticas al 5 y al 1 % de probabilidad. ns, no significativo. Lambda, coeficiente auto regresivo espacial (Anselin et al., 2011).

En cuanto al efecto del P aplicado como FDA al momento de la siembra sobre el rendimiento, el mismo presentó respuesta negativa en el sitio Chaján, observándose un efecto aditivo del P

voleado invernal (Tabla 3, significancia del parámetro β_3) y, siendo éste un 11.6% superior con respecto al tratamiento en bandas a la siembra (Figura 2).

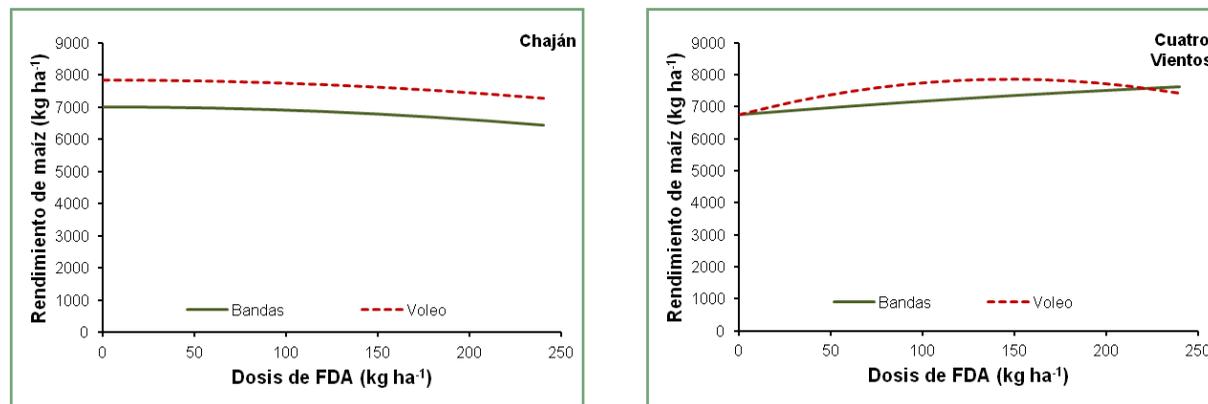


Figura 2. Rendimiento del maíz, en función de distintas dosis de FDA aplicada a la siembra para los tratamientos voleado en invierno (línea punteada) y en bandas a la siembra (línea llena).

Tabla 2. Rendimiento de maíz en kg ha⁻¹ según aplicación de P voleado en el invierno y en bandas a la siembra.

Voleo anticipado, kg ha ⁻¹ P	Bandas a la siembra, kg ha ⁻¹ P	Rendimiento, kg ha ⁻¹	
		Sitio Cuatro Vientos	Sitio Chaján
0	0	6471	7019
	16	7090	6957
	32	7244	6878
	48	7627	6454
30	0	6741	7836
	16	7628	7773
	32	7823	7695
	48	7418	7271

Tabla 3. Parámetros obtenidos del análisis estadístico de cada ensayo en los dos sitios para verificar la respuesta al Voleo y la interacción con FDA a la siembra. β_0 , β_1 , β_2 , son parámetros medios de la ecuación de regresión 3. β_3 , β_4 y β_5 , corrimiento de los parámetros para el factor voleo. SE, nivel de significancia estadística. * y **, diferencias estadísticas al 5 y al 1 % de probabilidad. ns, no significativo. Lambda, coeficiente auto regresivo espacial (Anselin et al., 2011).

	Voleo			
	Chaján		Cuatro Vientos	
	Parámetro	SE	Parámetro	SE
β_0	7428.163	**	6741.35	**
β_{1P}	0.2938	ns	9.95	**
β_{2P^2}	-0.009810	*	-0.027	**
β_{3V}	408.219	**	142.37	ns
β_{4VP}	-0.197	ns	5.26	**
β_{5VP^2}	0.0046	ns	-0.023	**
Lambda	0.84	**	0.97	**
R ²	0.812		0.899	

En el sitio Cuatro Vientos se detectó interacción entre el momento de aplicación y la dosis empleada del P sobre el rendimiento (**Tabla 3**, significancia de los parámetros β_4 y β_5). En este sentido, la respuesta a la aplicación de FDA fue de tipo óptimo para el tratamiento voleado mientras que para la aplicación en bandas la respuesta fue lineal y positiva con menores valores de producción en dosis medias y similares rendimientos en las dosis extremas (**Figura 1b**).

Estas diferencias encontradas entre sitios, en cuanto al tipo de respuesta a la fertilización fosforada, podrían deberse a los diferentes niveles de Zn determinado al momento de la siembra. En ambos experimentos los niveles de este nutriente (0.2 y 0.8 mg Zn kg suelo⁻¹ para Chaján y Cuatro Vientos, respectivamente) son inferiores a valor crítico en maíz de 1 mg Zn kg suelo⁻¹ (Ratto, 2006). En el sitio Chaján la deficiencia de Zn es muy probable y por lo tanto cabría esperarse que la fertilización con P incorporada al momento de la siembra usando FDA acentúe dicha deficiencia, debido a diferentes mecanismos por los cuales el P puede dificultar la absorción y el transporte de Zn en la planta (Malavolta, 2006).

Optimización agronómica y económica de la fertilización fosforada

En el sitio Chaján, tanto la DOAP (para maximizar producción) como la DOEP (maximizar retorno económico) fueron iguales a 0. Ello se debe a que el tipo de respuesta matemática observada fue negativa. Contrariamente en el sitio Cuatro Vientos se destaca claramente que en el tratamiento sin voleo invernal la respuesta a la aplicación de FDA fue lineal (**Figura 2**) y por lo tanto la dosis óptima agronómica (DOAP) fue aquella dosis máxima evaluada, es decir 240 kg ha⁻¹ permitiendo obtener 7627 kg ha⁻¹ de maíz. Por el contrario en el tratamiento con voleo invernal la DOAP fue de 146 kg ha⁻¹ de FDA, mientras que la DOEP fue 86 kg ha⁻¹ (**Tabla 4**).

Tabla 4. Dosis óptima agronómica (DOA) y dosis óptima económica (DOE) de P como kg de FDA para dos sitios experimentales (Córdoba).

	Chaján		Cuatro Vientos	
	DOAP	DOEP	DOAP	DOEP
	kg FDA ha ⁻¹			
Bandas	0	0	240	0
Voleado	0	0	146	86

En resumen, la DOEP como FDA aplicado incorporado al momento de la siembra, fue en Cuatro Vientos de 0 y 86 kg ha⁻¹, para el tratamiento en bandas a la siembra y el voleado anticipado en invierno, respectivamente. Mientras que en Chaján para ambos casos fue de 0 kg ha⁻¹. Sin embargo, es factible otro análisis económico de estas estrategias de fertilización para la relación de precios propuesta (27.74 kg maíz kg P⁻¹). El voleo de P durante el invierno tuvo un costo de 95.7 US\$ ha⁻¹ mediante el cual se lograron incrementos significativos de rendimiento de 953 y 916 kg ha⁻¹, lo cual representa un ingreso adicional de 109.60 y 105.34 US\$ ha⁻¹, con un margen de 13.9 y 9.54 US\$ ha⁻¹, para los sitios Chaján y Cuatro Vientos, respectivamente. De este modo se considera que la fertilización al voleo de P fue una práctica conveniente en términos económicos.

CONCLUSIÓN

Los datos experimentales permiten concluir que realizar voleos anticipados de P es conveniente agronómica y económicamente. Por otra parte, si bien son necesarias más evidencias, la combinación de dosis altas de P en bandas a la siembra con niveles muy bajos de Zn en el suelo pueden acentuar la deficiencia del micronutriente y limitar la respuesta a P si no se corrige mediante fertilización con Zn.

BIBLIOGRAFÍA

- Alesso, C., M. Pilatti, S. Imhoff y M. Grilli.** 2012. Variabilidad espacial de atributos químicos y físicos en un suelo de La Pampa llana Santafesina. En: Ciencia del suelo vol.30 no.1 Ciudad Autónoma de Buenos Aires jul. 2012.
- Andrade, F., A. Cirilo, S. Uhart, y M. Otegui.** 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. Editorial La Barrosa-Dekalb Press. Buenos Aires, Argentina.
- Anselin, L.** 1999. Spatial Econometrics. Staff paper. Bruton Center, School of Social Sciences, University of Texas at Dallas, Richardson. 31 pp.
- Berardo, A.** 2003. Manejo del fósforo en los sistemas de producción pampeanos. En: Simposio "El Fósforo en la Agricultura Argentina". Inpofos Cono Sur, Rosario, Argentina. pp 38-44.
- Bermudez, M.** 2011. Cómo llevar a la práctica en gran escala el manejo sitio-específico de N y P. Simposio Fertilidad 2011. Rosario-Santa Fé, Argentina. p: 47-54
- Bongiovanni, R.** 2001. Agricultura de Precisión y Sustentabilidad. En: 7° Congreso Nacional del Maíz. Pergamino, Argentina.
- Bray, R., y L.T. Kurtz.** 1945. Determination of total,

organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59:39-45.

Cerliani, C., M.F. Gomez, R. Naville, G. Balboa, y G. Espósito. 2014. Densidad de siembra optima de maíz (zea mays) ajustada por zonas de manejo. En: X Congreso Nacional de Maíz. Rosario, Argentina

Dillon, J., y J. Anderson. 1990. The analysis of response in crop and livestock production. Pergamon Press, New York (EUA). p: 250.

Espósito, G., G. Balboa, C. Castillo, R. Balboa, y A. Degioanni. 2012. Fecha de siembra y fertilización variable de maíz sobre Haplustoles de Córdoba. XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino y Latino Americano de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata. Buenos Aires. Argentina.

Ferraris, G., F. Mousegne, et al. 2008. Efecto aditivo del agregado de diferentes nutrientes en maíz en el norte, centro y oeste de la provincia de Buenos Aires. En: IV Jornada de Maíz INTA EEA Pergamino-AIANBA. 14 pp.

Fontanetto, H. 1993. Efecto del método de aplicación del fertilizante fósforico en maíz a dos niveles de disponibilidad hídrica. Tesis Magister Scientiae. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata.

García, F., K. Fabrizzi, M. Ruffo, y P. Scarabicchi. 1997. Fertilización nitrogenada y fosfatada de maíz en el sudeste de Buenos Aires. En: VI Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires. Argentina.

García, F. 2000. Requerimientos nutricionales de los cultivos. Jornada de actualización técnica para profesionales "Fertilidad 2000", INPOFOS, Rosario. pp 40-43

Gregoret, M.C., M. Díaz Zorita, J. Dardanelli, y R. Bongiovanni. 2011. Regional model for site-specific corn nitrogen fertilization rainfed in Haplustolls of the central pampas, Argentina. *Precision Agriculture.* 12(6): 831-849.

Gutiérrez Boem, F., J. Scheiner, L. Martín, y R. Lavado. 2002. Respuesta del cultivo de soja a la fertilización fosforada y nitrogenada. En: XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del suelo: 16-19.

Gutierrez Boem F., F. Garcia, y M. Boxler. 2010 ¿Qué tan distintos son los niveles críticos de fósforo disponible para soja, maíz y trigo? En: Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Fertilidad de Suelos y Nutrición Vegetal. Rosario, Santa Fe.

Inman, D.J., R. Khosla, y D.G. Westfall. 2005. Nitrogen uptake across sitespecific management zones in irrigated corn production systems. *Agron. J.* 97:169-176

Malavolta, E. 2006. Relación entre el fósforo y el zinc. *Informaciones Agropecuarias.*

Martínez Bologna, G., S. Castro, C. Cerliani, G. Balboa, R. Naville, y G. Espósito. 2014. Densidad de siembra de maíz asociada a la variabilidad espacial del suelo. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y II Reunión Nacional "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas". 5 al 9 de mayo de 2014. Bahía Blanca. Buenos Aires. Argentina.

MZA. 2000. Management Zone Analyst. Version 1.0.1.

University of MissouriColumbia & Agricultural Research Service of the United States Department of Agriculture.

Melgar R., y A. Caamaño. 1997. Fertilización nitrogenada, fosfatada y azufrada. *Revista Agromercado.* Cuadernillo de Maíz. Año II N° 12, pp:14-15.

Quantum GIS Development Team. 2011. Quantum GIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>

Ratto, S.E. 2006. Los microelementos en el sistema productivo del área pampeana. En: *Micronutrientes en la agricultura.* Ed. Vazquez M. AAC.S.:79-112.

Ritchie S.W., y J.J. Hanway. 1982. How a corn plant develops. Iowa State Univ. Special Report 48. Weiss, M.; Baret, F.; Smith, G.J.; Jonckheered, I. and Coppin, P. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination, part II: Estimation of LAI, errors and sampling. *Agric. and For. Met.,* 121: 37-53.

Vázquez, M. 2002. Balance y fertilidad fosforada en suelos productivos de la región pampeana. *Informaciones agronómicas del Cono Sur.* Edición especial sobre el simposio "Enfoque sistémico de la fertilización fosforada", XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn- Chubut, Argentina. 16: 3-7. ■

[volver al índice](#)

Mineralización de nitrógeno en maíz: efecto de zona y fecha de siembra

J.M. Orcellet^{1*}, N.I. Reussi Calvo^{2,3}, H.E. Echeverría³, H.R. Sainz Rozas^{3,4}, y A. Berardo²

¹INTA Rafaela, ²Laboratorio de suelos FERTILAB, ³Unidad Integrada Balcarce, ⁴CONICET

*Contacto: orcellet.juan@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

El nitrógeno (N) es el nutriente que con mayor frecuencia limita la producción de maíz (*Zea mays* L.) en la región pampeana Argentina (RP), producto de los altos requerimientos y por la disminución en los contenidos de materia orgánica (MO) de los suelos (Sainz Rozas et al., 2011). En la actualidad, los métodos utilizados para el diagnóstico de N en maíz no contemplan en forma directa el aporte realizado por la mineralización, a pesar que dicho proceso contribuye en promedio con 60 % de los requerimientos del cultivo (Steinbach et al., 2004).

Existen numerosos índices (químicos y biológicos) para estimar el aporte de N por mineralización (Griffin, 2008; Schomberg et al., 2009), entre estos se destaca el N incubado en anaerobiosis (Nan) por ser un método simple, preciso y rápido (Keeney, 1982). El Nan consiste en la cuantificación de $N-NH_4^+$ producido en incubaciones anaeróbicas a 40 °C durante un período de 7 a 14 días. Se ha determinado que el Nan es el mejor método biológico para estimar el aporte de N por mineralización (Bushong et al., 2007; 2008), siendo el mismo sensible a cambios en las prácticas de manejo y uso del suelo (Genovese et al., 2009; Reussi Calvo et al., 2013). Para los cultivos de maíz y trigo, se ha determinado que la incorporación del Nan a los modelos tradicionales de diagnóstico mejora la estimación de las necesidades de N (Sainz Rozas et al., 2008; Reussi Calvo et al., 2013; Reussi Calvo et al., 2014b). Esto indicaría que el Nan es un adecuado estimador de la mineralización, sin embargo, no hay registros de trabajos que evalúen la relación entre el Nan y la mineralización aparente de N (Nmin) durante el ciclo del cultivo de maíz estimada por el método del balance (Meisinger, 1984).

En la RP el maíz se produce bajo diversas condiciones edafo-climáticas, siendo marcadas las diferencias entre por ejemplo el Sudeste Bonaerense (SEB) y el Norte de la RP (NRP) (Figura 1). Se ha determinado que dichas zonas difieren entre otros factores en el contenido de Nan, siendo el prome-

dio de 70 y 35 mg kg⁻¹, respectivamente (Reussi Calvo et al., 2013; 2014a), y en la temperatura media (Tm) siendo esta superior en 6°C en el NRP para los primeros estadios del cultivo. Además, el efecto de la Tm puede ser marcado entre diferentes fechas de siembra dentro de una misma zona. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar como varía la Nmin y la relación de esta con el Nan para diferentes ambientes de la RP.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron 17 experimentos de fertilización en maíz bajo siembra directa en la campaña agrícola 2013 - 2014 en diferentes ambientes de la RP, 7 en el SEB y 10 en el NRP (5 en siembras tempranas y 5 en siembras tardías). Se evaluaron cinco dosis de N, sin embargo en el presente trabajo se utilizó únicamente el tratamiento testigo sin aplicación de N (0N). El diseño experimental fue en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones. Para que el fósforo y el azufre no fueran limitantes se aplicó a la siembra una dosis de 30-40 kg P ha⁻¹ y 20-25 kg S ha⁻¹.

En pre-siembra se realizó la determinación de MO, textura, y Nan en el estrato superficial (0-20 cm) y N-NO₃⁻ (N inicial) y humedad hasta los 60 cm de profundidad. El contenido de MO se determi-



Figura 1. Ubicación de los sitios experimentales del sudeste bonaerense (SEB) y del norte de la región pampeana (NRP).

nó por el método propuesto por Walkley y Black (1934) y el contenido de humedad por el método gravimétrico. El Nan se determinó mediante el método de incubación anaeróbica (Bremner y Keeney, 1965) propuesto por Gianello y Bremner (1986). La concentración inicial de $N-NO_3^-$ se determinó por colorimetría (Kenney y Nelson, 1982). Además, a la cosecha del maíz en los tratamientos ON se determinó el contenido de $N-NO_3^-$ hasta los 60 cm de profundidad (N residual).

A cosecha se evaluó el rendimiento y se expresó al 14.5 % de humedad (**Tabla 1**). El N absorbido por el tratamiento ON (Ntpl) se estimó en función del rendimiento (0 % de humedad), N en grano (Ngr) e índice de cosecha de N (ICN). El N en planta se determinó por el método de Dumas (Jung et al., 2003) mediante un analizador TruSpec CN (LECO, 2010). La Nmin se estimó mediante el método del balance (Meisinger, 1984):

$$Nmin (kg ha^{-1}) = Ntpl (kg ha^{-1}) + N \text{ residual } (kg ha^{-1}) - N \text{ inicial } (kg ha^{-1})$$

Para comparar las variables edáficas y de cultivo entre zonas y fechas de siembra, se realizaron análisis de la varianza utilizando el procedimiento incluido en las rutinas del programa R commander (R Core Team, 2014). Cuando las diferencias entre tratamientos fueron significativas, se empleó el test de la diferencia mínima significativa (DMS), con un nivel de probabilidad de 5 %. Además, se realizaron análisis de regresiones lineales simples empleando el procedimiento lm (lineal model). Por último, para determinar coincidencia entre modelos de regresión, se utilizaron variables indicadoras (dummy) al 0.05 de probabilidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El contenido de MO promedio fue de 6.2 y 2.8 % para el SEB y NRP, respectivamente ($p < 0.05$). Los menores niveles de MO en el NRP se explicarían en parte por la prolongada historia agrícola de los suelos, las texturas más gruesas y mayor Tm, factores que han favorecido balances

Tabla 1. Materia orgánica (MO), disponibilidad inicial de $N-NO_3^-$ (N inicial), nitrógeno incubado en anaerobiosis (Nan), rendimiento en grano de maíz, nitrógeno en grano (Ngr) y mineralización aparente de N (Nmin) en los sitios del sudeste bonaerense (SEB) y del norte de la región pampeana (NRP) donde se implantó el cultivo de maíz.

SEB						
Sitio	Suelo			Planta		Nmin (kg ha ⁻¹)
	MO (%)	N inicial (kg ha ⁻¹)	Nan (mg kg ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Ngr (%)	
Sitio 1	6.2	103	59	7750	1.49	71
Sitio 2	7.0	92	74	7704	1.34	75
Sitio 3	5.7	55	64	7378	1.22	68
Sitio 4	5.8	57	81	9226	1.34	112
Sitio 5	6.0	63	87	9854	1.26	117
Sitio 6	7.4	73	78	8857	1.22	97
Sitio 7	5.5	128	51	10 994	1.27	67
NRP						
a) Temprano						
Sitio 8	1.5	53	18	5553	1.07	42
Sitio 9	2.2	41	28	8459	1.00	74
Sitio 10	3.2	57	34	9544	1.07	85
Sitio 11	3.0	60	34	10 687	0.97	84
Sitio 12	3.1	66	33	10 170	1.02	98
b) Tardío						
Sitio 13	3.3	75	34	13 205	1.15	138
Sitio 14	2.9	62	34	12 865	1.04	142
Sitio 15	2.4	64	25	10 420	1.32	120
Sitio 16	2.6	61	21	9610	1.26	111
Sitio 17	3.5	64	32	13 343	1.24	171

negativos de carbono (Sainz Rozas et al., 2011). Por otra parte, el contenido promedio de Nan fue de 71 mg kg⁻¹ (mínimo de 51 y máximo de 87 mg kg⁻¹) para el SEB y 29 mg kg⁻¹ (mínimo de 18 y máximo de 34 mg kg⁻¹) para el NRP. El mayor contenido en el SEB se explicaría en parte a los mayores niveles de MO y arcilla respecto al NRP. Estos valores son similares a los reportados por otros autores (Sainz Rozas et al., 2008; Reussi Calvo et al., 2013; 2014a).

El rendimiento promedio del cultivo de maíz fue de 8823, 8883 y 11 890 kg ha⁻¹ para el SEB, maíces tempranos y tardíos del NRP, respectivamente (**Figura 2a**). El mayor rendimiento obtenido en siembras tardías del NRP se explicaría en parte por las mejores condiciones hídricas. Por otro lado, el contenido promedio de Ngr fue de 1.31, 1.03 y 1.20 % para el SEB, maíces tempranos y tardíos del NRP, respectivamente, siendo significativas ($p < 0.05$) las diferencias entre zonas y fechas de siembra. Por el contrario, para el ICN no se determinó diferencia significativa ($p > 0.05$) entre zona siendo el promedio de 71, 69 y 67 %, para el SEB, maíces tempranos y tardíos del NRP, respectivamente, valores similares a los informados por otros autores (Andrade et al., 2000, Ciampitti et al., 2010).

Para el SEB la Nmin promedio fue de 87 kg ha⁻¹ con valores que van desde 67 hasta 117 kg ha⁻¹ (**Figura 2b**). Considerando una eficiencia de absorción del N del sistema del 80 % (Meisinger, 1984), el N mineralizado a nivel de sistema suelo fue de 109 kg ha⁻¹, similar a lo reportado por Echeverría y Bergonzi (1995) para un N potencialmente mineralizable (N0) de 180 mg kg⁻¹ y 50 % de agua

útil. Además, según el modelo desarrollado por Echeverría et al. (2000) este valor de N0 representa un valor de Nan de 70 ppm, similar al determinado como promedio en el SEB. En siembras tempranas del NRP la Nmin promedio fue de 77 kg ha⁻¹ (mínimo de 42 y máximo de 98 kg ha⁻¹) (**Figura 2b**), similares a los obtenidos por otros autores (Faccendini et al., 2008). Por último, para maíces tardíos del NRP la Nmin promedio fue de 136 kg ha⁻¹ (**Figura 1b**), con valores que van desde 111 hasta 171 kg ha⁻¹. En general, al comparar maíces de siembra temprana, se asume que los suelos del SEB presentan mayor mineralización de N respecto a los suelos del NRP debido a los mayores contenidos de MO y Nan. No obstante, en el presente trabajo la Nmin no difirió entre zonas ($p < 0.05$) (**Figura 2b**). La mayor Tm y la textura más gruesa de los suelos del NRP incrementan la tasa de mineralización de N, lo que permitiría compensar la diferencia en el potencial de mineralización (Nan). Por otra parte, dentro del NRP se determinó diferencia significativa ($p < 0.05$) entre fechas de siembra. Los mayores valores registrados en siembras tardías se explicarían por la mayor Tm y disponibilidad hídrica, siendo estos los principales factores que afectan la tasa de mineralización (Quemada y Cabrera, 1997; Zak et al., 1999).

En las diferentes zonas y fechas de siembra se determinó estrecha asociación (r^2 desde 0.57 hasta 0.83) entre el Nan y la Nmin (**Figura 3**). Al comparar las pendientes de los modelos se determinó diferencia significativa ($p > 0.05$) entre el SEB y el NRP (siembras tempranas y tardías)

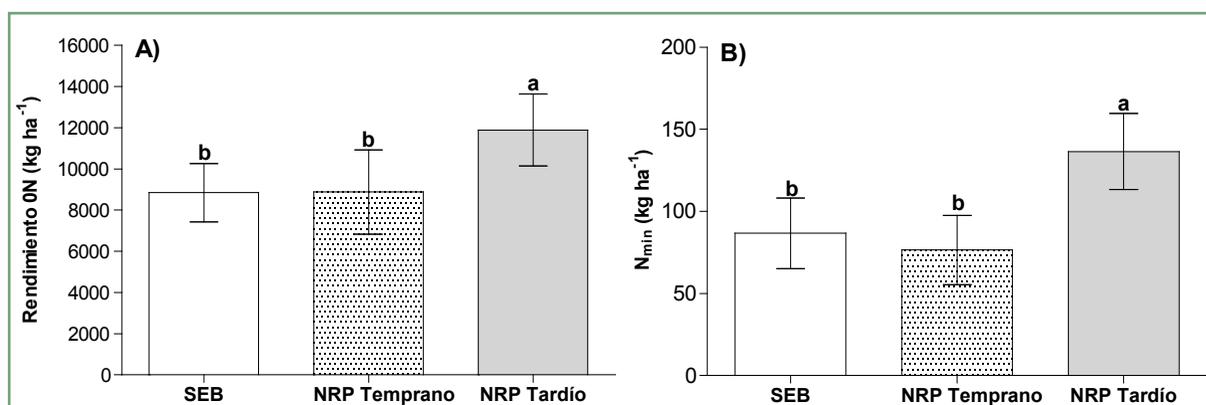


Figura 2. A) Rendimiento del testigo (ON) y B) Mineralización aparente de nitrógeno (Nmin) para el sudeste bonaerense (SEB), maíz temprano (NRP Temprano) y maíz tardío del norte de la región pampeana (NRP Tardío). Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticamente significativas con un DMS 5 % de probabilidad. Líneas verticales indican desvío estándar de la media.

(Figura 3). La menor pendiente de SEB se explicaría en parte por la menor T_m durante el ciclo del cultivo y textura más fina. Por lo tanto, estos resultados indicarían que no es posible emplear un único modelo para estimar la N_{min} , en función del N_{an} . Por otro lado, al comparar las pendientes de los modelos propuestos para el NRP (siembras tempranas y tardías), no se determinó diferencia significativa ($p > 0.05$). Sin embargo, se determinó que dichos modelos difieren significativamente ($p < 0.05$) en la ordenada al origen, esto se explicaría en parte por la mayor T_m en los maíces tardíos y mejores condiciones hídricas respecto a tempranos. Esto explicaría, también, la mayor mineralización de N en maíces tardíos respecto a tempranos.

Estos resultados demuestran por un lado que el N_{an} es un buen estimador de la N_{min} , siendo necesario el empleo de diferentes algoritmos según zonas y fecha de siembra, y por el otro contribuyen a explicar porque la incorporación del N_{an} a los métodos actuales de diagnóstico de N mejora la estimación de la oferta de N, tal como ha sido reportado en otros trabajos (Sainz Rozas et al., 2008, Reussi Calvo et al., 2013, Reussi Calvo et al., 2014b). En síntesis y a modo de ejemplo, para obtener una N_{min} de 100 kg ha⁻¹ es necesario un valor de N_{an} en el estrato superficial (0-20 cm) de aproximadamente 80, 40 y 20 mg kg⁻¹ (ó ppm) en el SEB, maíces tempranos y tardíos del NRP, respectivamente (Figura 3).

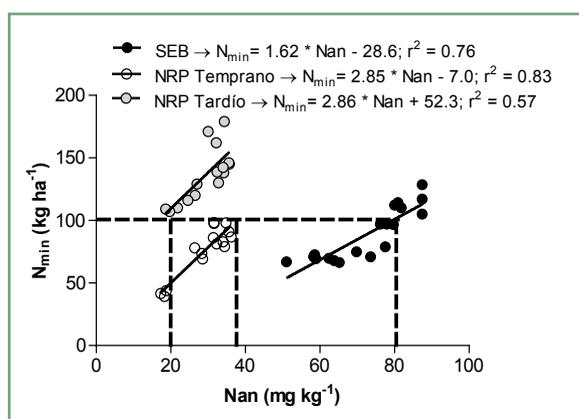


Figura 3. Mineralización aparente de nitrógeno (N_{min}) en función del nitrógeno incubado en anaerobiosis (N_{an}) para el sudeste bonaerense (SEB), maíz temprano (NRP Temprano) y maíz tardío del NRP (NRP).

CONCLUSIONES

En el presente estudio se determinó una mayor mineralización de N en maíces de siembras tardías del norte de la región pampeana, respecto a siembras tempranas de la misma zona y del sudeste bonaerense. Además, el N_{an} resultó un estimador adecuado de la mineralización de N en condiciones de campo, siendo necesario el empleo de diferentes algoritmos según zona y fecha de siembra. Por lo tanto, la incorporación del N_{an} a los métodos tradicionales de diagnóstico de N sería una alternativa promisoría para mejorar la estimación de la oferta de N desde el suelo y, por ende, el ajuste de la dosis de fertilizante.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible por el apoyo financiero de FERTILAB (Laboratorio de Suelos y Plantas), INTEA S.A. y del Proyecto INTA (PNSUELO-1134024).

BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, F.H., H.E. Echeverría, N.S. Gonzáles, y S.A. Uhart.** 2000. Requerimientos de nutrientes minerales. En: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. (eds.). Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. INTA Balcarce. Facultad de Ciencias Agrarias (UNMP). pp. 207-233
- Bremner, J., y D. Keeney.** 1965. Steam distillation methods for determination of ammonium, nitrate and nitrite. *Annal. Chem. Acta.* 32: 485-495.
- Bushong, J.T., R.J. Norman, W.J. Ross, N.A. Slaton, C.E. Wilson, y E.E. Gbur.** 2007. Evaluation of several indices of potentially mineralizable soil nitrogen. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 38: 2799-2813.
- Bushong, J.T., T.L. Roberts, W.J. Ross, R.J. Norman, N.A. Slaton, y C.E. Wolson.** 2008. Evaluation of distillation and diffusion techniques for estimating hydrolyzable amino sugar-nitrogen as a means of predicting nitrogen mineralization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72: 992-999.
- Ciampitti, I.A., M. Boxler, y F. García.** 2010. Nutrición de Maíz: Requerimientos y Absorción de Nutrientes. *Informaciones agronómicas del Cono Sur* N° 48. pp. 14-18.
- Echeverría, H.E., y R. Bergonzi.** 1995. Estimación de la mineralización de Nitrógeno en suelos del Sudeste Bonaerense, *Boletín técnico* N° 135. ISSN: 0522-054. EEA INTA Balcarce.
- Echeverría, H.E., N. San Martín, y R. Bergonzi.** 2000. Métodos rápidos de estimación del nitrógeno potencialmente mineralizable en suelos. *Ci. Suelo.* 18: 9-16

- Faccendini, N.R., R. Melchiori, O. Caviglia, y O. Papparotti.** 2008. Evaluación de métodos para estimar la mineralización de nitrógeno a campo. XXI Congreso argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina. En CD.
- Genovese, M.F., H.E. Echeverría, G.A. Studdert, y H.R. Sainz Rozas.** 2009. Nitrógeno de amino-azúcares en suelo: calibración y relación con el nitrógeno incubado anaeróbico. *Ci. Suelo*. 27(2): 225-236.
- Gianello, C., y J.M. Bremer.** 1986. Comparison of chemical methods of assessing potentially available organic nitrogen in soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 17: 215-236.
- Griffin, T.S.** 2008. Nitrogen availability. In: Schepers, J. S.; Raun, W. R. (eds.). *Nitrogen in Agricultural Systems*. Agron. Monogr. 49. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI. pp. 613-646.
- Jung, S., D.A. Rickert, N.A. Deak, E.D. Aldin, J. Recknor, L.A. Johnson, y P.A. Murphy.** 2003. Comparison of Kjeldahl and Dumas methods for determining protein contents of soybean products. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 80:1169-1173.
- Keeney, D.R.** 1982. Nitrogen-availability indices. In: Page, A. L. et al. (eds.). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties* American Society of Agronomy. Soil Science Society of America. pp. 711-733.
- Keeney, D.R., y D.W. Nelson.** 1982. Nitrogen inorganic forms. In: Page, A.L. et al. eds. *Methods of soil analysis. Part 2. Agron. Monog 9 ASA and SSSA, Madison, WI.* pp. 643-698
- LECO.** 2010. Organic application notes. [en línea] <<http://www.leco.com/>> [consulta: marzo de 2014].
- Meisinger, J.J.** 1984. Evaluating plant-available nitrogen in soil-crop systems. In: Hauck, R. D. (ed.). *Nitrogen in Crop Production*. pp. 391-441. Amer. Soc. Agron. Madison, WI.
- Quemada, M., y M.L. Cabrera.** 1997. Temperature and water effects on nitrogen mineralization from surface-applied cover crop residues. *Plant and Soil* 189: 127-137.
- R Core Team.** 2014. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [En línea] <<http://www.R-project.org>>.
- Reussi Calvo, N., M.P. Calandroni, G. Studdert, F. Cabria, N. Diovisalvi, y A. Berardo, A.** 2014 a. Nitrógeno incubado en anaerobiosis y materia orgánica en suelos agrícolas de Buenos Aires. En: XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca. En CD.
- Reussi Calvo, N.I., H. Sainz Rozas, H. Echeverría, y A. Berardo.** 2013. Contribution of anaerobically incubated nitrogen to the diagnosis of nitrogen status in spring wheat. *Agron. J.* 105(2): 321-328.
- Reussi Calvo, N., H.E. Echeverría, H.R. Sainz Rozas, A. Berardo, y N. Diovisalvi.** 2014 b. Can a soil mineralization test improve wheat and corn nitrogen diagnosis?. *Better Crops with Plant Food*, 98(2), 12-14.
- Sainz Rozas, H.R., H.E. Echeverría, y H.P. Angelini.** 2011. Niveles de materia orgánica y de pH en suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana Argentina. *Ciencia del Suelo* 29:29-37.
- Sainz Rozas, H.R., P.A. Calviño, H.E. Echeverría, P.A. Barbieri, y M. Redolati.** 2008. Contribution of anaerobically mineralized nitrogen to the reliability of planning or presidedress soil nitrogen test in maize. *Agron. J.* 100(4): 1020-1025.
- Schomberg, H.H., S. Wietholter, T.S. Griffin, D.W. Reeves, M.L. Cabrera, D.M. Endale, D.S. Fisher, J.F. Novak, K.S. Balcom, R.L. Raper, N.R. Kitchen, M.A. Locke, K.N. Potter, R.C. Schwartz, C.C. Truman, y D.D. Tyler.** 2009. Assessing indices for predicting potential nitrogen mineralization in soils under different management systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 1575-1586.
- Steinbach, H.S., R. Alvarez, y C. Valente.** 2004. Balance between mineralization and immobilization of nitrogen as affected by soil mineral nitrogen level. *Agrochimica*. 48: 204-212.
- Walkley, A., y I.A. Black.** 1934. An examination of De-gtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.
- Zak, D.R., W.W. Holmes, N.W. Macdonald, y K.S. Pregitzer.** 1999. Soil temperature, matric potential, and the kinetics of microbial respiration and nitrogen mineralization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 575-584. ■

[volver al índice](#)

¿Podemos mejorar el diagnóstico de nitrógeno en maíz en la región pampeana?

J.M. Orcellet^{1*}, N.I. Reussi Calvo^{2,3*}, H.E. Echeverría³, H.R. Sainz Rozas^{3,4}, N.V. Diovialvi², y A. Berardo²

¹INTA Rafaela, ²Laboratorio de suelos FERTILAB, ³Unidad Integrada INTA-FCA Balcarce, ⁴CONICET

*Contacto: orcellet.juan@inta.gob.ar, nreussicalvo@laboratoriofertilab.com.ar

INTRODUCCIÓN

El nitrógeno (N) es uno de los principales factores que limita el rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en la Región Pampeana Argentina (RP). Por lo tanto, es necesario contar con métodos de diagnóstico de requerimiento de N precisos en pos de maximizar la eficiencia de uso de dicho nutriente. En la actualidad existen diferentes metodologías, entre las más difundidas se encuentran la determinación del contenido de N-NO₃⁻ en pre-siembra del cultivo (TNPS) y en el estadio de seis hojas desarrolladas (V6) (Ritchie y Hanway, 1982) (TNV6) (Sainz Rozas et al., 2008).

Para la metodología basada en el TNPS la dosis de N se define en función de la concentración de N-NO₃⁻ previo a la siembra del cultivo y los umbrales de requerimiento de N varían según zona, sistema de labranza y rendimiento objetivo (Echeverría y Sainz Rozas, 2005). Para el sudeste bonaerense (SEB) se determinó que dicha metodología explicó el 37 % de la variación del rendimiento del testigo sin N (0N) (Sainz Rozas et al., 2008), mientras que en el norte de la RP (NRP) la capacidad predictiva varió entre el 53 y 58 % (Salvagiotti et al., 2011). No obstante, esta metodología puede sobreestimar la dosis de N en suelos con altos contenidos de materia orgánica (MO), debido a que no contemplan los aportes de N por mineralización durante el ciclo del cultivo. Frente a esta situación, y para regiones como el SEB se recomienda el TNV6 por su mayor capacidad predictiva ($r^2=0.56$) (Sainz Rozas et al., 2008), dado que incluiría parcialmente la capacidad de mineralización de N del suelo (Magdoff et al., 1984). Sin embargo, la principal limitante de esta metodología es el escaso tiempo entre la toma de muestra de suelo y la fertilización. Por lo tanto, la incorporación de un índice de mineralización al TNPS mejoraría la estimación de la oferta de N para el cultivo y además otorgaría ventajas prácticas al momento del diagnóstico de N.

El N incubado en anaerobiosis (Nan) (Keeney, 1982) es un índice de mineralización simple, preciso y rápido, apto para ser utilizado como método

de rutina en un laboratorio de servicio. Además, se determinó que el Nan es un buen estimador de la mineralización aparente de N (Nmin) durante el ciclo del cultivo de maíz en diferentes zonas de la RP (Orcellet, 2015). Por lo tanto, su incorporación al TNPS mejoraría la estimación de la oferta de N para el cultivo, y por ende la capacidad predictiva de dicho método. Para el cultivo de maíz y trigo (*Triticum aestivum* L) en el SEB, se determinó que el uso de un índice combinado entre el TNPS y Nan incrementó la capacidad predictiva del rendimiento del 0N (Reussi Calvo et al., 2013, Echeverría et al., 2015, Reussi Calvo et al., 2014). Sin embargo, en la actualidad no se han publicado trabajos que evalúen el empleo de un índice combinado (TNPS + Nan) como método de diagnóstico de N en maíz en ambientes con características edafo-climáticas contrastantes, tales como el SEB y el NRP. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar la capacidad predictiva del TNPS combinado o no con el Nan en diversos ambientes de la RP.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron 19 experimentos de fertilización en maíz en la campaña agrícola 2013-14 en diferentes ambientes de la RP, 9 en el SEB y 10 en el NRP (5 en siembras tempranas y 5 en siembras tardías). Todos los experimentos se realizaron bajo siembra directa en lotes con diferente historia agrícola. Se evaluaron cinco dosis de N, sin embargo en el presente trabajo se utilizó únicamente el tratamiento testigo sin aplicación de N (0N). El diseño experimental fue en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones. Para que el fósforo y el azufre no fueran limitantes se aplicó a la siembra una dosis de 30-40 kg P ha⁻¹ y 20-25 kg S ha⁻¹.

En pre-siembra se realizó la determinación de MO, y Nan en el estrato superficial (0-20 cm) y N-NO₃⁻ (TNPS) y humedad hasta los 60 cm de profundidad. El contenido de MO se determinó por el método propuesto por Walkley y Black

Tabla 1. Materia orgánica (MO), test N-NO₃⁻ en pre-siembra (TNPS), nitrógeno incubado en anaerobiosis (Nan), rendimiento en grano del testigo de maíz, en los sitios del sudeste bonaerense (SEB) y del norte de la región pampeana (NRP) donde se implantó el cultivo.

SEB				
Sitio	Suelo			Planta
	MO (%)	TNPS (kg ha ⁻¹)	Nan (mg kg ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
Sitio 1	6.2	103	59	7750
Sitio 2	7	92	74	7704
Sitio 3	6.2	100	85	8460
Sitio 4	5.7	55	64	7378
Sitio 5	5.8	57	81	9226
Sitio 6	6	63	87	9854
Sitio 7	7.4	73	78	8857
Sitio 8	5.5	128	51	10 994
Sitio 9	5.9	65	63	7095
NRP				
a) Temprano				
Sitio 10	1.5	53	18	5553
Sitio 11	2.2	41	28	8459
Sitio 12	3.2	57	34	9544
Sitio 13	3.0	60	34	10 687
Sitio 14	3.1	66	33	10 170
b) Tardío				
Sitio 15	3.3	75	34	13 205
Sitio 16	2.9	62	34	12 865
Sitio 17	2.4	64	25	10 420
Sitio 18	2.6	61	21	9610
Sitio 19	3.5	64	32	13 343

(1934), y el contenido de humedad por el método gravimétrico. El Nan se determinó mediante el método de incubación anaeróbica (Bremner y Keeney, 1965) propuesto por Gianello y Bremner (1986). Se incubaron a 40 °C durante 7 días, 10 g de suelo y tamizado a 2 mm en tubos de ensayo (150 mm de alto * 16 mm de diámetro). El NH₄⁺ producido durante la incubación se determinó mediante la destilación por arrastre con vapor y se expresó en mg kg⁻¹. La concentración inicial de N-NO₃⁻ se determinó por colorimetría (Kenney; Nelson, 1982). A cosecha se evaluó el rendimiento y se expresó al 14.5 % de humedad (**Tabla 1**) y además se estimó el Nmin por el método del balance (Meisinger, 1984).

Para comparar las variables edáficas, Nmin y rendimiento entre zonas y fechas de siembra, se realizaron análisis de la varianza utilizando el procedimiento incluido en las rutinas del programa R commander (R Core Team, 2014). Cuando las dife-

rencias entre tratamientos fueron significativas, se empleó el test de la diferencia mínima significativa (DMS), con un nivel de probabilidad de 5 %. Además, se realizaron análisis de regresiones lineales simples empleando el procedimiento lm (lineal model). Por último, para determinar coincidencia entre modelos de regresión, se utilizaron variables indicadoras (dummy) al 0.05 de probabilidad. Los modelos fueron validados con datos extraídos de Sainz Rozas et al. (2008) para el SEB, mientras que para el NRP se utilizaron experimentos previos realizados en diferentes sitios y años (n = 12) (Reussi Calvo et al., 2013b).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La disponibilidad inicial promedio de N (TNPS) fue de 82, 55 y 65 kg N ha⁻¹ para el SEB, maíces tempranos y tardíos del NRP, respectivamente, valores similares a los reportados por otros au-

tores para dichas condiciones (Sainz Rozas et al., 2008; Reussi Calvo et al., 2013b; Salvaggiotti et al., 2014), siendo no significativa ($p > 0.05$) la diferencia entre zonas y fechas de siembra. Por el contrario para el contenido de Nan se determinó diferencia significativa ($p < 0.05$) entre zonas, siendo el promedio de 71 mg kg^{-1} para el SEB y 29 mg kg^{-1} para el NRP. Para ambas zonas se determinó una débil asociación entre el Nan y el TNPS ($r^2 = 0.27$). Similares resultados han sido reportados por diferentes autores para el SEB (Sainz Rozas et al., 2008; Reussi Calvo et al., 2013). Esto podría deberse a que el contenido N-NO_3^- no solo depende del N mineralizable, sino también del balance entre los aportes y pérdidas de N del sistema, los que a su vez dependen de las condiciones hídricas del año y de las prácticas de manejo de suelo (Genovese et al., 2009; Divito et al., 2011). Esto refuerza la posibilidad de que un índice combinado (TNPS + Nan) mejore la estimación de la oferta de N para el cultivo.

Se determinaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en el rendimiento del ON entre zonas y fecha de siembra, siendo el promedio de 8591, 8883 y $11\ 890 \text{ kg ha}^{-1}$ para el SEB, maíces tempranos y tardíos del NRP, respectivamente. La Nmin promedio para el SEB fue de 80 kg ha^{-1} , para maíces tempranos del NRP fue 77 kg ha^{-1} y para maíces tardíos del NRP fue de 136 kg ha^{-1} , siendo significativa la diferencia entre zonas ($p < 0.05$). Los mayores valores registrados en siembras tardías se explicarían en gran parte por la mayor temperatura media y disponibilidad hídrica.

Para las diferentes zonas y fechas de siembra se determinó relación positiva ($p < 0.05$) entre el TNPS y el rendimiento del ON. En el SEB el TNPS explicó solo el 14 % de la variación del rendimiento del ON (Figura 1), no obstante, Sainz Rozas et

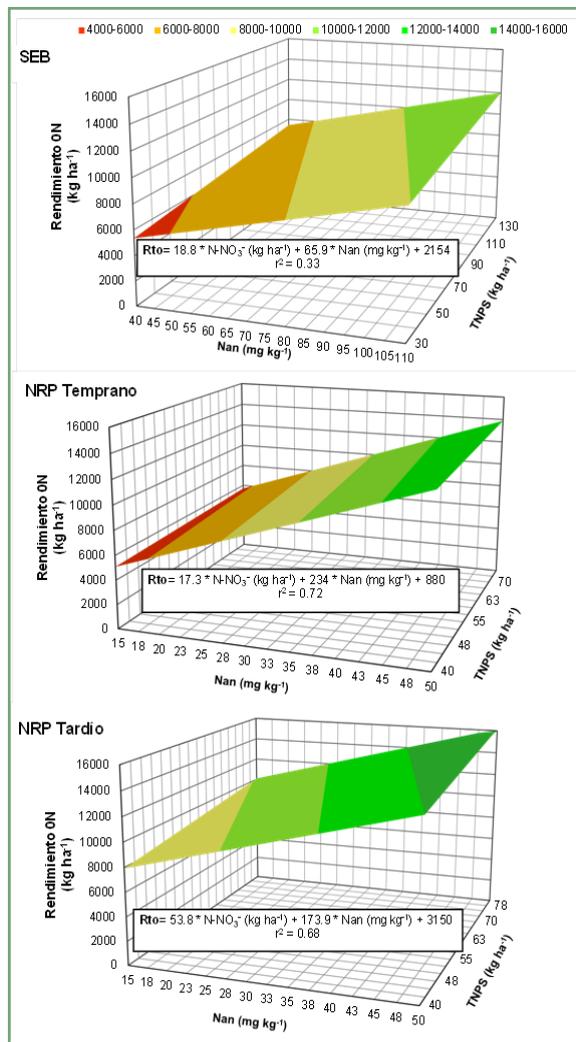


Figura 2. Rendimiento de maíz sin N (ON) en función del test N-NO_3^- en pre-siembra (TNPS) y nitrógeno incubado en anaerobiosis (Nan) para el sudeste bonaerense (SEB), maíz temprano (NRP Temprano) y maíz tardío del norte de la región pampeana (NRP Tardío).

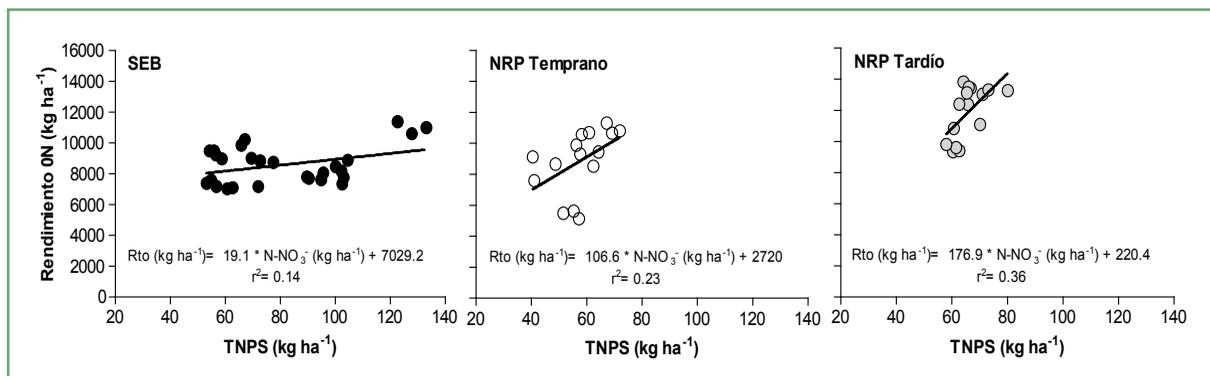


Figura 1. Rendimiento de maíz sin N (ON) en función del test N-NO_3^- en pre-siembra (TNPS) para el sudeste bonaerense (SEB), maíz temprano (NRP Temprano) y maíz tardío del norte de la región pampeana (NRP Tardío).

al. (2008) utilizando rendimiento relativo del 0N determinaron que la capacidad predictiva del TNPS fue del 37 %. Para maíces tempranos del NRP, el TNPS explicó el 23 % de la variación del rendimiento del 0N ($p < 0.05$), sin embargo otros autores determinaron que la capacidad predictiva de dicha metodología fue entre 53 y 58 %, según la potencialidad del ambiente (Salvagiotti et al., 2011). Para las siembras tardías del NRP la capacidad predictiva del rendimiento del 0N fue del 36 %. Estos resultados se explicarían en parte por la diferencia de temperatura media en el período de barbecho entre zonas y fechas de siembra. Sin embargo, la baja capacidad predictiva del TNPS en los diferentes ambientes, podría deberse en parte a que dicha metodología no contempla los aportes de N por mineralización durante el ciclo del cultivo.

La incorporación del Nan al TNPS contribuyó significativamente a explicar la variación del rendimiento del 0N para ambas zonas y fechas de siembra (**Figura 2**). En el SEB el uso combinado del Nan y el TNPS incrementó la capacidad predictiva al 33 %, siendo el aporte parcial del Nan del 19 % (**Figura 2**), similar a lo reportado en otro trabajo (Echeverría et al., 2015). Para el NRP el modelo combinado entre el TNPS y el Nan explicó el 72 y 68 % de la variación del rendimiento 0N, con un aporte parcial del Nan del 49 y 32 % para maíces tempranos y tardíos, respectivamente (**Figura 2**). A pesar de no existir diferencia significativa ($p > 0.05$) en Nmin entre el SEB y maíces tempranos del NRP, se determinó menor aporte

parcial del Nan en el SEB. Sin embargo, esto se explicaría en parte por la menor disponibilidad hídrica en algunos sitios del SEB, que posiblemente haya limitado el rendimiento del 0N y el aporte por mineralización de N. Además, las escasas precipitaciones en el período de barbecho (40 mm) en maíces tempranos del NRP redujeron la incidencia relativa del TNPS, cobrando mayor importancia el N mineralizado. Dentro del NRP al comparar entre fechas de siembra, se determinó menor contribución parcial del Nan al TNPS en siembras tardías lo cual se explicaría por una mayor mineralización en el período de barbecho debido a la mayor temperatura media.

Dado que en el presente trabajo se evaluó un año de experimentación, se realizó la validación de los modelos propuestos para el SEB y maíces tempranos del NRP (TNPS + Nan) empleando datos independientes, generados con anterioridad (Sainz Rozas et al., 2008; Reussi Calvo et al., 2013b). Para ambas zonas se determinó estrecha asociación entre el rendimiento observado y predicho (**Figura 3**). Para el SEB se determinó que la pendiente no difirió de 1 ($p > 0.05$), mientras que la ordenada al origen difirió de 0 ($p < 0.05$). Por otro lado, para maíces tempranos del NRP se determinó que la ordenada al origen y la pendiente no difirieron ($p > 0.05$) de 0 y 1, respectivamente, tanto cuando se las analizaron por separado como conjuntamente (**Figura 3**). Estos resultados ponen de manifiesto la bondad de los modelos obtenidos en el presente trabajo para estimar el rendimiento del cultivo de maíz sin fertilizante nitrogenado.

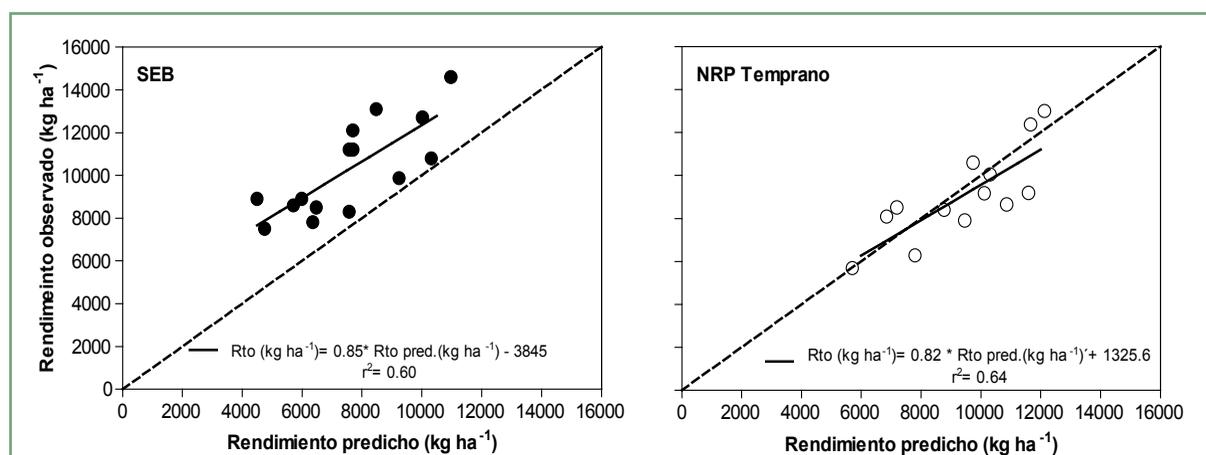


Figura 3. Rendimiento de maíz sin N (0N) observado en función del predicho para el modelo de: test N-NO₃⁻ en pre-siembra (TNPS) y nitrógeno incubado en anaerobiosis (Nan) para el sudeste bonaerense (SEB) y maíz temprano del norte de la región pampeana (NRP Temprano).

CONCLUSIONES

La determinación del TNPS junto con el contenido de Nan permite cuantificar con mayor precisión la oferta de N para el cultivo de maíz en diferentes ambientes de la RP y, por ende, incrementar la capacidad predictiva del rendimiento del ON. Esta información es un aspecto clave al momento de definir la dosis de N en los programas de fertilización.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se hizo posible por el apoyo financiero de Fertilab (Laboratorio de Suelos y Plantas), INTEA S.A. y del Proyecto INTA (PN-SUELO-1134024).

BIBLIOGRAFÍA

- Bremner, J., y D. Keeney.** 1965. Steam distillation methods for determination of ammonium, nitrate and nitrite. *Annal. Chem. Acta.* 32: 485-495.
- Divito, G.A., H.R. Sainz Rozas, H.E. Echeverría, G.A. Studdert, y N. Wyngaard.** 2011. Long term nitrogen fertilization: Soil property changes in an Argentinean Pampas soil under no tillage. *Soil and Tillage Research*, 114(2), 117-126.
- Echeverría, H. E., H.R. Sainz Rozas, y P. A. Barbieri.** 2015. Maíz y Sorgo. En: Echeverría, H. E.; García, F. O. (eds.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Ediciones INTA. pp. 435-478. ISSN 978-987-521-565-8
- Echeverría, H.E., y H.R. Sainz Rosas.** 2005. Nitrógeno. En: HE. Echeverría y FO. García (eds). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina. Pp. 69-95
- Genovese, M. F., H.E. Echeverría, G. A. Studdert, y H.R. Sainz Rozas.** 2009. Nitrógeno de amino-azúcares en suelo: calibración y relación con el nitrógeno incubado anaeróbico. *Ci. Suelo.* 27(2): 225-236.
- Gianello, C., y J.M. Bremer.** 1986. Comparison of chemical methods of assessing potentially available organic nitrogen in soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 17: 215-236.
- Keeney, D.R.** 1982. Nitrogen-availability indices. In: Page, A. L. et al. (eds.). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties* American Society of Agronomy. Soil Science Society of America. pp. 711-733.
- Keeney, D.R., y D.W. Nelson.** 1982. Nitrogen inorganic forms. In: Page, A.L. et al. eds. *Methods of soil analysis. Part 2. Agron. Monog 9 ASA and SSSA, Madison, WI.* pp. 643-698
- Magdoff, F. R., D. Ross, y J. Amadon.** 1984. A soil test for nitrogen availability to maize. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 1301-1304.
- Orcellet, J.M.** 2015. Contribución del nitrógeno incubado en anaerobiosis al diagnóstico de nitrógeno en maíz. Tesis M.Sc. Facultad de Ciencias Agrarias. UNMdP. Balcarce, Argentina. En revisión.
- R Core Team.** 2014. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [En línea] <<http://www.R-project.org>>.
- Reussi Calvo, N. I., H. Sainz Rozas, H. Echeverría, y A. Berardo.** 2013a. Contribution of anaerobically incubated nitrogen to the diagnosis of nitrogen status in spring wheat. *Agron. J.* 105(2): 321-328.
- Reussi Calvo, N., H.E. Echeverría, H.R. Sainz Rozas, A. Berardo, y N. Diovisalvi.** 2014. Can a soil mineralization test improve wheat and corn nitrogen diagnosis?. *Better Crops with Plant Food*, 98(2), 12-14.
- Reussi Calvo; N., H.R. Sainz Rozas, A. Berardo, H.E. Echeverría, y N. Diovisalvi.** 2013b. ¿El Nan contribuye a mejorar el diagnóstico de nitrógeno en maíz?. Simposio de Fertilidad, 18 y 19 de Mayo, Rosario, Santa Fe, Argentina.
- Rice, C.W., y J.L. Havlin.** 1994. Integrating mineralizable nitrogen indices into fertilizer nitrogen recommendations. In: Havlin, J. L.; Jacobsen, J. S. (eds.) *Soil Testing: Prospects for improving nutrient recommendations*. Spec. Pub. No. 40. SSSA, Madison, WI. pp. 1-13.
- 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.R., P.A. Calviño, H.E. Echeverría, P.A. Barbieri, y M. Redolati.** 2008. Contribution of anaerobically mineralized nitrogen to the reliability of planning or presidedress soil nitrogen test in maize. *Agron. J.* 100(4): 1020-1025.
- Salvagiotti, F., F. Ferraguti, J. Enrico, G. Prieto.** 2014. Respuesta a nitrógeno en maíz de fecha tardía según cultivo antecesor. En: XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca. En CD.
- Salvagiotti, F., J.M. Castellarin, F.J. Ferraguti, y H.M. Pedrol.** 2011. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz según potencial de producción y disponibilidad de nitrógeno en la región pampeana norte. *Ci. Suelo.* 29(2): 199-212.
- Walkley, A., y I.A. Black.** 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38. ■

[volver al índice](#)

¿Cómo influye la agriculturización sobre la calidad edáfica y los stocks de carbono en el Chaco Subhúmedo?

N. Osinaga^{1,3}, J.E. Castro¹, C.R. Álvarez¹, y M.A. Taboada^{1,2,3}

¹Facultad de Agronomía (UBA); ²Instituto de Suelos INTA Castelar 3CONICET

*Contacto: nosinaga@agro.uba.ar; Av. San Martín (8000) CABA; 011-45248076

INTRODUCCIÓN

Desde fines de la década del '70 se viene dando en el país un avance de la frontera agropecuaria (Gasparri y Grau, 2009; Viglizzo y Jobbagy, 2010). El Chaco Subhúmedo y Semiárido de la provincia de Santiago del Estero tiene una de las mayores superficies de bosques nativos y desde 1997 ocurrió un notable aumento de la superficie desmontada (Albanesi et al., 2003; Volante et al., 2009). El cambio del uso de la tierra influye sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Lal, 1993).

La pérdida de los bosques no solo reduce los stocks de carbono en la vegetación sino también causa pérdidas importantes del carbono orgánico del suelo (Neill et al., 1998; Post y Kwon, 2000; Desjardins et al., 2004). El bosque chaqueño posee un 60% del C acumulado en la biomasa área y un 40% en el primer metro del suelo, y por la gran superficie que ocupa en la Argentina constituye un gran reservorio de carbono (Gasparri et al., 2008). Por la introducción de la agricultura se puede perder hasta un 50 % de materia orgánica del suelo después de 20 a 30 años en los bosques de América tropical, hasta llegar a un nuevo equilibrio (Eswaran et al., 1993). En el E del Chaco Subhúmedo se han detectado reducciones en los niveles de la materia orgánica en los primeros centímetros, sobre todo de su fracción lábil (Álvarez y Lavado, 1998; Roldán et al., 2000; Albanesi et al., 2003; Sánchez et al., 2006; Barbero et al., 2010). Los principales motivos que generaron dicha disminución fueron la deforestación sumada al monocultivo de soja y algodón, el aumento de los años de agricultura y el manejo inadecuado.

Asimismo, la intensidad y estacionalidad de las lluvias, el paisaje suavemente ondulado, la fragilidad del ambiente y el clima subtropical predisponen a una mayor degradación física de los suelos (Prause et al., 1997; Venialgo et al., 2002; Albanesi et al., 2003). En la región a mediados de la década del '90 se produjo la adopción de la siembra directa. Esta técnica se adoptó en el

país por los bajos costos de producción, por la posibilidad de incorporar áreas menos productivas (Satorre, 2005; Derpsch et al., 2010), por el ahorro de tiempo operativo y por la nula remoción del suelo que permite reducir la erosión, recuperar la estabilidad de los agregados, conservar el agua y aumentar el secuestro de carbono (Panigatti et al., 2001; Díaz Zorita et al., 2002; Viglizzo et al., en Viglizzo y Jobbagy, 2010). Pese a tener muchas ventajas, la siembra directa puede impactar negativamente sobre algunas propiedades físicas del suelo superficial (densidad aparente, resistencia a la penetración), ya que se reduce la formación mecánica de macroporos y se tiende a la formación de estructuras de tipo laminar y masiva (Sasal et al., 2006; Strudley et al. 2008; Álvarez et al., 2009; 2012). Esto se debe al tránsito de las maquinarias pesadas que producen compactación excesiva, sobre todo cuando el suelo se encuentra húmedo (Botta et al., 2004).

El objetivo del presente trabajo fue determinar la calidad física y el stock de carbono orgánico (CO) de los suelos del Chaco Subhúmedo con distinta cantidad de años de uso agrícola desde el desmonte (menos de 10 años bajo agricultura y más de 20 años de agricultura), tomando como referencia la situación de bosque nativo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de muestreo y tratamientos

El muestreo se llevó a cabo en lotes de establecimientos del este del Departamento Moreno de la provincia de Santiago del Estero (**Figura 1**). Este área se encuentra dentro de la región natural Chaco subhúmedo y ocupa una franja meridional que bordea el límite Este del Chaco semiárido (Vargas Gil, 1988). Las precipitaciones anuales varían de 700 mm a 1000 mm. La temperatura media anual es de 21°C. Los suelos más representativos son los Haplustoles, Argiustoles y Ustifluventes (Vargas Gil, 1988).

Determinaciones

Se seleccionaron sitios bajo siembra directa continua por distintos periodos a partir del desmonte (menores a 10 años y mayores a 20 años) y en distintos suelos (Haplustoles y Argiustoles típicos). Se muestrearon cuatro situaciones de cada combinación suelo y manejo. También se muestreó la situación de monte nativo sobre los Haplustoles, suelo predominante del área bajo estudio. Se determinó el CO por combustión húmeda con el método de Walkley-Black (Nelson y Sommers, 1996) hasta los el metro de profundidad. Se calculó la relación de estratificación del CO (ESCO) (Franzluebbers, 2002) como la relación entre el contenido de 0-5 cm respecto de 5-20 cm. Los contenidos de carbono del suelo se calcularon a profundidad fija y a masa constante de suelo (Neill et al., 1997), para aislar el efecto de diferencias en la densidad de los suelos.

En las mismas situaciones se determinaron las siguientes propiedades físicas edáficas:

1. Densidad aparente (DA): se determinó por el método del cilindro, tomando muestras hasta el metro de profundidad, con 4 submuestras tomadas a lo largo de una transecta y 4 repeticiones en cada lote.
2. Resistencia a la penetración (RP): Se determinó hasta los 40 cm a intervalos de 5 cm de profundidad con un penetrómetro de golpe, modelo INTA Villegas con punta cónica de 60° (Burke et al., 1986), realizándose 4 determinaciones por lote. A la par se determinó el contenido hídrico gravimétrico (CHG) a dos profundidades (0-20 y 20-40 cm).
3. Infiltración (IF): A través del método rápido de la USDA (1999), se registraron datos de infiltración en cuatro posiciones dentro de cada lote.

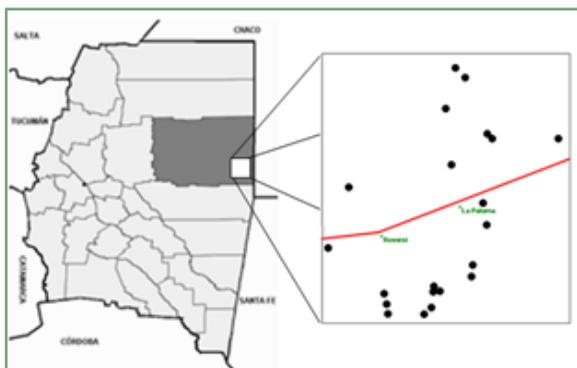


Figura 1. Ubicación de los establecimientos muestreados en el departamento Moreno, provincia de Santiago del Estero. Elaboración propia.

Estas dos últimas determinaciones se realizaron solo en los lotes bajo agricultura.

Se realizó análisis de la varianza (ANOVA) y se utilizó la Prueba LSD ($p \leq 0.05$) para la comparación de medias, previa comprobación del supuesto de normalidad mediante el Test de Shapiro Wilks (modificado).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Densidad aparente

No se encontraron diferencias significativas entre los suelos analizados y no existe interacción suelo x uso. En el bosque nativo, la DA aumenta con la profundidad, en superficie (0-20 cm) en promedio el valor es de 0.88 g cm^{-3} y en el estrato más profundo (80-100 cm) la DA es de 1.14 g cm^{-3} , es decir que hay un aumento del 30%. Los lotes agrícolas no siguen dicha tendencia, sus densidades son mayores en superficie (0-20 cm) y en profundidad (80-100 cm) y los menores valores se encuentran en el estrato de 20 a 80 cm (**Figura 2**). El aumento de la DA con profundidad se atribuye a una disminución de la materia orgánica, y a la compactación que se produce por el peso de los estratos superiores (Yamashita et al., 2008). La mayor densidad observada en los primeros 20 cm de los suelos agrícolas se debe al tránsito agrícola (Willhelm et al., 2004) y al menor contenido de CO.

Hasta los 60 cm hay diferencias significativas entre las tres situaciones analizadas ($p < 0.05$), por lo que existe un efecto del uso sobre la DA de los suelos que va decreciendo en profundidad. Los suelos con más de 20 años de uso agrícola poseen una DA de 1.20 g cm^{-3} en los primeros 20 cm, un 7% mayor que los suelos de con pocos años de uso (1.12 g cm^{-3}) y un 36% por arriba de los valores que posee el bosque nativo (0.88 g cm^{-3}). En el estrato de 20 a 60 cm los lotes con más años de uso tienen una DA de 1.13 g cm^{-3} , 6% más que los de menor uso (1.07 g cm^{-3}) y 16% más que la situación prístina (0.97 g cm^{-3}). De 60 a 80 cm la DA para las tres situaciones es de 1.09 g cm^{-3} y de 80 a 100 cm de 1.15 g cm^{-3} (**Figura 2**).

Los bajos valores encontrados en la situación prístina se debe principalmente a sus altos contenidos de materia orgánica, que ayuda a mantener la estabilidad de los agregados, predominando una estructura granular (**Foto 2**). El aumento de la DA a medida que pasan los años puede llegar a afectar la exploración radical, situación observada

en los primeros centímetros del suelo con larga historia agrícola como un crecimiento horizontal de las raíces secundarias y engrosamiento de la raíz principal (**Foto 1**). Esto podría estar asociado a la presencia de estructura laminar (**Foto 2**) en los primeros centímetros del suelo (0-15 cm). El valor de 1.20 g cm^{-3} en los lotes con más de 20 años de uso no alcanza el valor crítico de $1.5\text{-}1.6 \text{ g cm}^{-3}$ propuesto por Reynolds et al. (2002) para suelos arcillosos y Rojas (2012) para la región, que impedirían la extensión de las raíces. Rojas (2012) y Coria (2004), también afirman que el cambio del uso del suelo en la ecorregión Chaqueña provoca un aumento de la DA relacionada con pérdidas de carbono orgánico, lo que evidencia una caída de la calidad física. Los valores obtenidos en este trabajo son menores que las densidades obtenidas por Rojas (2012) pero mayores a las de Coria (2004).

Stocks de Carbono

Se observa una reducción significativa en el CO de los lotes agrícolas con respecto a la situación prístina (cortina de bosque nativo) hasta los 60 cm. Entre el 40% (lotes agrícolas) y el 49% (bosque nativo) del CO se encuentra en los primeros 20 cm de suelo. Para el estrato de 0 a 5 cm la disminución en el CO fue de un 54%, mientras

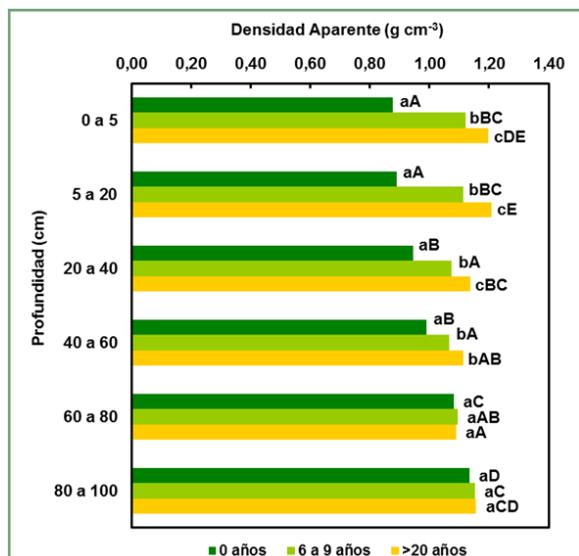


Figura 2. Evolución de la densidad aparente hasta los 100 cm de profundidad para los diferentes años de uso agrícola del suelo. Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre situaciones dentro de un mismo estrato, letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas por efecto de la profundidad dentro de una situación ($p < 0.05$).

que para el horizonte subsuperficial fue del 64% (**Figura 3**). Estos resultados coinciden con los obtenidos por Rojas (2012) en la región, pero difieren con los obtenidos por Albanesi et al. (2003), quien no encontró diferencias significativas para el horizonte superficial.

Los contenidos de CO hasta el metro de profundidad se ordenaron de la siguiente manera: El bosque tiene secuestrado en promedio 120.7 t ha^{-1} y los lotes agrícolas entre $72 \text{ y } 77 \text{ t ha}^{-1}$, un 40% menos (**Figura 4**). El contenido de CO está relacionado con el aporte de carbono de la vegetación, como se observa en la **Foto 3** la cobertura es mayor en el bosque debido a un mayor aporte y una mayor productividad primaria neta. En la región pampeana Sainz Rozas et al. (2011) afirman que la reducción del CO respecto al suelo prístino oscila del 36 al 53%, lo cual ubica a la región estudiada en el medio de este rango de variación. Esta pérdida de CO es explicada por



Foto 1. Crecimiento horizontal de las raíces en algodón (izquierda) y maíz (derecha)



Foto 2. Estructura del suelo en los primeros 15 cm: Granular (izquierda) en el bosque nativo y laminar-masiva en lotes de más de 20 años de uso.

el menor aporte de los cultivos al suelo (Álvarez, 2006) y por la mayor susceptibilidad a la erosión (Andriulo y Cardone, 1998).

La ESCO fue menor en el monte (Figura 5), hecho atribuible a la presencia de vegetación leñosa permite una mayor homogeneidad en la distribución de la materia orgánica en el perfil, debido al patrón de distribución radical.

Infiltración

Los suelos con más años de uso agrícola presentaron una infiltración media menor (126 mm

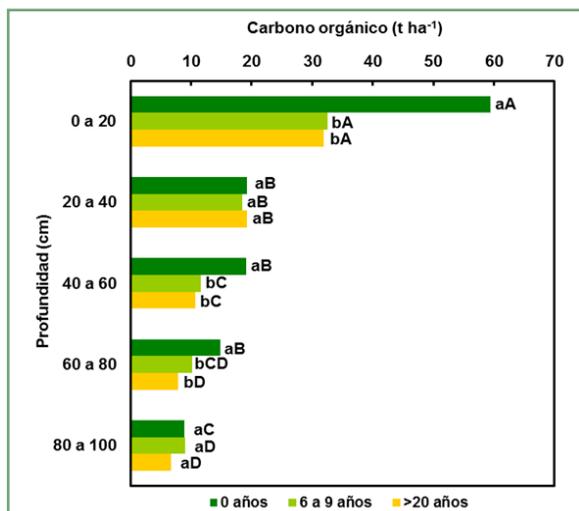


Figura 3. Evolución del contenido de carbono del suelo (CO) hasta los 100 cm de profundidad. Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre situaciones dentro de un mismo estrato, letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas por efecto de la profundidad dentro de una situación (p<0.05).

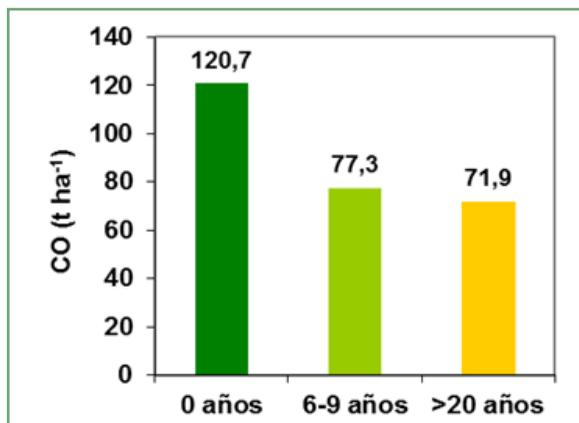


Figura 4. Stocks de carbono a masa constante de suelo (9885 tn ha⁻¹ de suelo) para distintos años de uso del suelo.

h⁻¹) que los suelos con menor antigüedad (153 mm h⁻¹) y se encontró una relación logarítmica negativa con la DA (p<0.05) (Figura 6).

Resistencia a la penetración

La RP (0-40 cm) estuvo linealmente relacionada

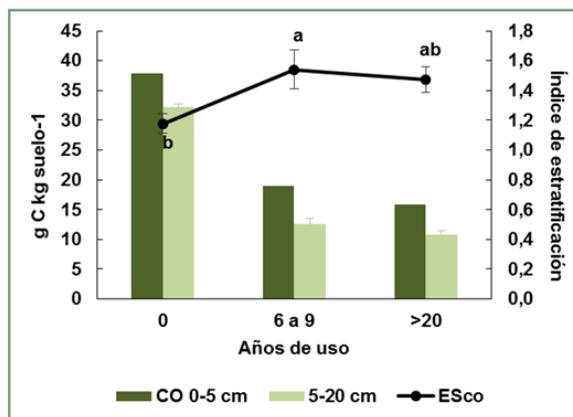


Figura 5. Evolución del contenido de carbono del suelo (CO) hasta los 20 cm de profundidad y del índice de estratificación para los diferentes años de uso. Letras diferentes indican diferencias significativas (p<0.05).

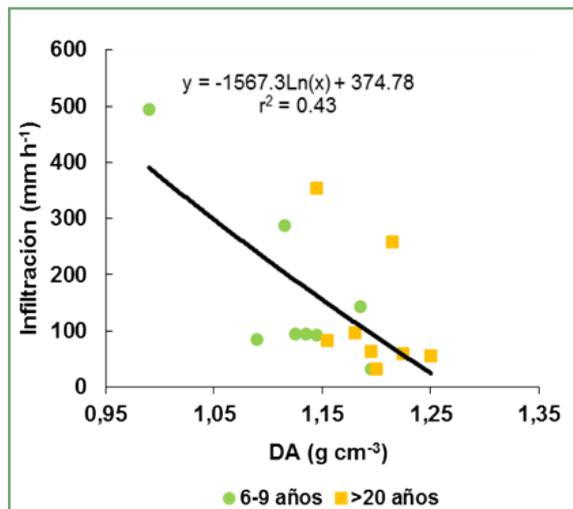


Figura 6. Relación entre infiltración y densidad aparente (DA).



Foto 3. Cobertura del suelo. Izquierda: Bosque nativo. Derecha: Lote agrícola.

con el CHG ($r^2=0.34$) (Figura 7). Los valores de RP corregidos a CHG de 28 dag kg^{-1} fueron significativamente ($p<0,05$) más altos en los suelos con más de 20 años de uso agrícola en el estrato de 10 a 40 cm (Figura 8).

Por debajo de los 15 cm, tanto los Argiustoles como los Haplustoles con más de 20 años de uso, presentaron valores de RP por arriba de los 2 MPa (Figura 8). Esto indicaría una compactación debido al continuo tránsito de las maquinarias. Esta consecuencia ha sido también observada en la región por otros autores (Venialgo et al., 1998; Restelli et al., 1998). Los valores inferiores a 1.5 MPa en la profundidad de 0-10 cm, se pueden atribuir al mayor contenido de materia orgánica en esa profundidad.

Analizando la función lineal de la Figura 7, se pone de manifiesto que el valor crítico de 2 MPa se alcanza con CHG menores a 27 dag kg^{-1} . Algunos lotes a pesar de presentar una elevada humedad poseen resistencias críticas y estos coinciden con suelos de larga historia agrícola.

CONCLUSIONES

Se observa un importante cambio en la calidad física edáfica por el uso agrícola. Las propiedades físicas y el stock CO de fueron indicadores sensibles al cambio de uso de la tierra operado en la región estudiada. No hubo diferencias de comportamiento entre los suelos Argiustoles y Haplustoles. Se recomienda la aplicación de medidas preventivas de la compactación por tránsito de maquinaria, y propiciar mecanismos de agregación biótica que permitan mejorar la agregación del suelo.

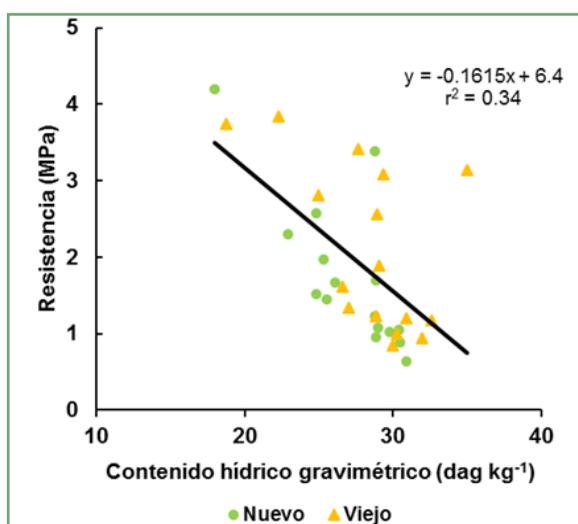


Figura 7. Relación entre resistencia a la penetración y contenido hídrico gravimétrico.

BIBLIOGRAFÍA

- Andriulo, A., y G. Cordone.** 1998. Impacto de labranzas y rotaciones sobre la materia orgánica de suelos de la Región Pampeana Húmeda. Pp 65-96, en: JL Panigatti; H Marelli; D Buschiazzi y R Gil (eds.). Siembra directa. Hemisferio Sur; Buenos Aires; Argentina.
- Albanesi, A., A. Anriquez, y A. Polo Sanchez.** 2003. Efectos de la agricultura convencional sobre algunas formas del C en una toposecuencia de la Región Chaqueña, Argentina. AGRISCIENTIA VOL. XX: 9-17.
- Álvarez, C.R., M.A. Taboada, F.H. Gutiérrez Boem, A. Bono, P.L. Fernández, y P. Prystupa.** 2009. Topsoil properties as affected by tillage systems in the Rolling Pampa region of Argentina. Soil Sci. Soc. Am. J. 73: 1242-1250.
- Álvarez, C.R., P. Fernández, y M.A. Taboada.** 2012. Relación de la inestabilidad estructural con el manejo y propiedades de los suelos de la región pampeana. Cienc. Suelo, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, v. 30, n. 2.
- Álvarez, R., y R.S. Lavado.** 1998. Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. Geoderma 83: 127-141
- Alvarez, R.** 2006. Materia orgánica, valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos. Editorial Facultad de Agronomía. Buenos Aires, Argentina. 206 pp.
- Barbero, F., H.P. Apezteguía, y R. Sereno.** 2010. Tasa de mineralización del suelo luego del desmonte en Córdoba y Santiago del Estero. HUMUSLAB. URL: humuslab.com/articulos/resumen-expandido.doc
- Botta, G.F., D. Joraujuria, R. Balbuena, y H. Rossato.** 2004. Mechanical and cropping behavior of direct drilled soil under different traffic intensities: effect of soybean (*Glycyne max L.*) yields. Soil Till. Res. 78: 53-58.
- Burke, W., D. Gabriels, y J. Bouma (eds).** 1986. Soil structure assessment. AA Balkema. Rotterdam, Netherlands. 92 pp.

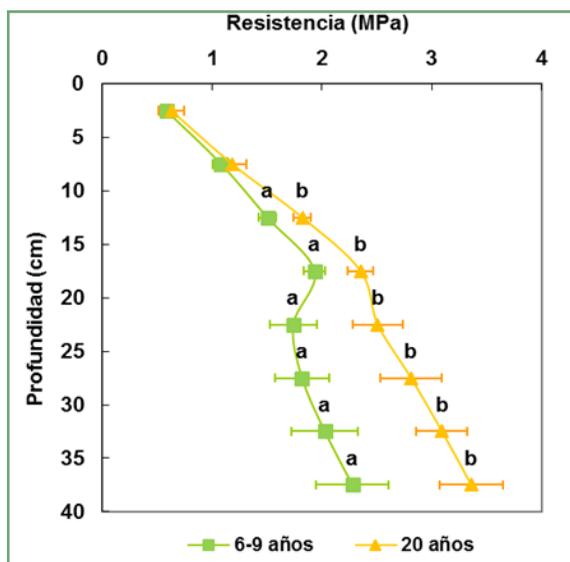


Figura 8. Cambios en la resistencia a la penetración hasta los 40 cm de profundidad según años bajo agricultura. Letras diferentes indican diferencias significativas entre usos para una misma profundidad ($p<0.05$).

- Coria, R.D.** 2004. Influencia de la agricultura en las propiedades hidráulicas del suelo en un paisaje del Chaco Semiárido: I. Suelos en ambientes generadores de escorrentía. Trabajo Final de Graduación. Universidad Nacional de Santiago del Estero-Facultad de Ciencias Forestales.
- Derpsch, R., T. Friedrich, A. Kassam, y H.W. Li.** 2010. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *Int. J. Agric. y Biol. Eng.* Vol. 3. N°1.
- Desjardins, T., E. Barros, M. Sarrazin, C. Girardin, y A. Mariotti.** 2004. Effects of forest conversion to pasture on soil carbon content and dynamics in Brazilian Amazonia. *Agroc. Ecosyst. Environ.* **103**, 365-373.
- Díaz-Zorita, M., G. Duarte, y J. Grove.** 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil and Till Research.* **65**: 1-18
- Eswaran, H., E. van den Berg, y P. Reich.** 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of American Journal*, **57**, 192-194.
- Franzluubbers, A.** 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil and Tillage Research* **66**: 95-106.
- Gasparri, N.I., H.R. Grau, y E. Manghi** 2008. Carbon pools and emissions from deforestation in extra-tropical forests of northern Argentina between 1900 and 2005. *Ecosystems* **11**:1247-1261.
- Gasparri, N.I., H.R. Grau, y E. Manghi.** 2009. Deforestation and fragmentation of Chaco dry forest in NW Argentina (1972-2007). *Forest Ecology and Management* **258**: 913-921.
- Lal, R.** 1993. Soil degradation, soil quality and soil resilience. *Soil Tillage Res.* **29**, 1-8.
- Neill, C., J. Melillo, P.A. Steudler, C.C. Cerri, J.F.L. Moraes, M.C. Piccolo y M. Bitro.** 1997. Soil carbon and nitrogen stocks following forest clearing for pasture in southwestern Brazilian Amazon. *Ecol. Appl.* **7**, 1216-1225.
- Neill, C., C. Cerri, J. Melillo, B. Feigl, P. Steudler, J. Moraes, y M. Piccolo.** 1998. Stocks and dynamics of soil carbon following deforestation for pasture in Rondonia. In Lal R, Kimble J, Follet R, Stewart B. (eds): *Soil processes and the carbon cycle*. CRC Press, Boca Raton, Boston, NY, Washington, London, pp 9-28.
- Nelson, D.W., y L.E. Sommers.** 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. En: Sparks DL (ed.) *Methods of soil analysis*, part 3, chemicals methods, SSSA book series N°5, SSSA, Madison, WI, pp. 961-1010.
- Post, W.M., y K.C. Kwon.** 2000. Soil carbon sequestration and land use change : processes and potential. *Global Change Biology.* **6**, 317-327.
- Prause, J., H. Dalurzo, y A.P. Lifschitz.** 1997. Variaciones en algunas propiedades físicas de un suelo forestal como consecuencia de su cambio a uso agrícola. *Actas XV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, Santa Rosa, La Pampa. 25-26.
- Panigatti, J.L., H. Marelli, y D. Buschiazzi (Eds.)** 2001. *Siembra directa II*. INTA. Buenos Aires. Argentina. 377pp.
- Restelli, R.M., N. Gutierrez, y C. Venialgo.** 1998. **Propiedades edáficas relacionadas al sistema secuencial maíz-soja en labranza cero en la región chaqueña semirárida.** *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas.* UNNE. T.III: 12-14
- Reynolds, W.D., B.T. Bowman, C.F. Drury, C.S. Tan, y X. Lu.** 2002. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma* **110**: 131-146.
- Rojas, J.M.** 2012. Indicadores de calidad de suelos en la Ecorregión chaqueña. Valores de referencia, umbrales y de la situación inalterada. Programa Nacional de Ecorregiones-INTA. EEA Sáenz Peña.
- Roldán S., G. Lorenz y L. Bonelli.** 2000. Aspectos de calidad de la materia orgánica del suelo en función del uso de la tierra en el Centro Este santiagueño. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata. Argentina. En soporte CD.
- Sainz Rozas H.R., 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**: 29-37.
- Sánchez M.C., O. Heredia, N. Bartoloni, C. González y N. Arrigo.** 2006. Secuencias de Cultivos y Labranzas: efecto sobre las fracciones de carbono del suelo. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 19 al 22 de Septiembre. Salta. En soporte CD.
- Sasal, M.C., A.E. Andriulo, y M.A. Taboada.** 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil and Tillage Research.* Volume 87, Issue 1, May 2006, pages 9-18.
- Satorre, E.H.** 2005. Cambios tecnológicos en la agricultura actual. La transformación de la agricultura argentina. *Ciencia Hoy*, **15**:24-31.
- Strudley M.W., T.R. Green y J.C. Ascough II.** 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: state of the science. *Soil Tillage Res.* **99**: 4-48.
- Vargas Gil, R.** 1988. Chaco sudamericano: regiones naturales. X Reunión Grupo Campos y Chaco FAO UNESCO MAP INTA.
- Venialgo, C., N. Gutierrez, L. Silva, N. Ramirez, R. Restelli, y O. Ingaramo.** 1998. Caracterización del estado de compactación de suelo en lotes con labranza cero. 9° Reunión de Comunicaciones Científicas y Técnicas. Facultad de Ciencias Agrarias. UNNE. Pp. 120
- Venialgo, C., N. Gutierrez, A. Corrales, D. Drganc, y A. Asselborn.** 2002. Estabilidad de agregados y resistencia a la penetración en series de suelos con distintos usos en el Sudoeste del Chaco. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas.* UNNE. Resumen: A-056.
- Viglizzo, E.F. y E. Jobaggy.** 2010 (Eds). *Expansión de la frontera agropecuaria argentina y su impacto ecológico-ambiental.* 102pp. INTA.
- Volante, J.N., J.M. Paruelo, L. Vale, C. Morales, y S. Suhring.** 2009. Dinámica espacial y temporal de la deforestación en la región Chaqueña del Noroeste Argentino Período 1977-2007. Laboratorio de Teledetección y SIG, INTA EEA Salta. Poster. XIII° Congreso Forestal Mundial 2009.
- USDA.** 1999. *Soil Quality Test Kit Guide.* USDA-Agriculture Research Service. SCS. USA. 82 pp.
- Wilhelm, W.W., J.M.F. Johnson, J.L. Hatfield, W.B. Voorhees, y D.R. Linden.** 2004. Crop and soil productivity response to corn residue removal: a literature review. *Agron. J.* **96**:1-17.
- Yamashita, N., S. Ohta, y A. Hardjono.** 2008. Soil change induced by *Acacia mangium* plantation establishment: comparison with secondary Forest and *Imperata cylindrica* grassland soils in South Sumatra, Indonesia. *Forest Ecol Manage* **254**:362-370. ■

[volver al índice](#)

Propuestas de ajuste de la fertilización nitrogenada del trigo según datos pluviométricos previos a la siembra

J.M. Pautasso^{1*}, J. Kuhn², P.A. Barbagelata³ y R.J.M. Melchiori³

¹AER INTA Diamante; ²Estudiante FCA UNER. ³EEA INTA Paraná

*Contaco: pautasso.juan@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

El trigo (*Triticum aestivum* L.), por superficie sembrada, es el cultivo de invierno más importante en la provincia de Entre Ríos. Por otro lado la inclusión de cultivos de cereales con una adecuada fertilización, en rotación con leguminosas mejora la calidad del suelo a través de un aumento en el almacenamiento de carbono orgánico (Urquiaga et al., 2004). El agua y el nitrógeno (N) son los principales factores que limitan el crecimiento y rendimiento de los cereales. Incluso, la magnitud de la respuesta al N depende de la disponibilidad de agua, determinando cada año el éxito o el fracaso de la fertilización nitrogenada en regiones semiáridas (Martínez et al., 2014). Melchiori et al. (2011), afirman que el efecto interanual podría ser de mayor magnitud que el inducido por la aplicación de N en regiones subhúmedas, y Milisich et al. (2006) informan que una buena recarga del perfil del suelo durante el otoño, sumado a bajas precipitaciones durante el período crítico de crecimiento de la espiga, son las condiciones ambientales más favorables para obtener altos rendimientos de trigo en Entre Ríos. Por lo tanto, el agua es un factor que debería incluirse en los modelos de recomendación de fertilización nitrogenada (Schlegel et al., 2005).

La metodología más difundida para el diagnóstico de nitrógeno se basa principalmente en la determinación del contenido de N como nitrato (N-NO₃) en el suelo (0-60 cm) al momento de la siembra. Para su empleo, se han propuestos distintos umbrales de disponibilidad de N (N del suelo + N del fertilizante), los cuales varían según la zona, el manejo y el rendimiento objetivo del cultivo (García y Berardo, 2006). En la región se cuenta con mucha información sobre el manejo de la fertilización para el cultivo de trigo y las recomendaciones publicadas derivan de una gran cantidad de campañas y condiciones (Melchiori y Barbagelata, 2002; Melchiori et al., 2011).

Atendiendo la variabilidad interanual de los

rendimientos y buscando mejorar el manejo de la fertilización se han propuestos distintas estrategias; por ejemplo aplazar el muestreo de suelos y la fertilización hasta macollaje, para minimizar la pérdida de nitratos como consecuencia de excesos hídricos en otoño (Barbieri et al., 2009); dividir y ajustar las dosis durante distintos estadios del cultivo, ya que el potencial de rendimiento comienza a construirse en las primeras etapas del ciclo del cultivo y se concreta poco después del período de encañado (Hoffman et al., 2002; Ferrari et al., 2010); determinar nitratos y estimar la mineralización del nitrógeno durante el ciclo del cultivo, ya que en general, el aporte de N por mineralización representa el 30% de la demanda de N del trigo (Reussi Calvo et al., 2013). En estos estudios el factor agua ingresa como explicativo de los resultados obtenidos.

A pesar del gran esfuerzo en investigación realizado desde las distintas instituciones públicas y privadas, la adopción de las recomendaciones de fertilización no parece ser alta entre los productores, teniendo en cuenta la baja intensidad de muestreo de suelos en argentina (García, 2011), etapa necesaria para implementar un manejo racional de la fertilización.

Por otro lado y con el objetivo de cuantificar la importancia del agua del suelo, Fontanetto et al. (2009) encontraron un buen ajuste entre agua útil a la siembra y rendimiento de trigo, en situaciones de suficiencia de nutrientes; el cálculo realizado fue hasta el metro de profundidad y diferenciando horizontes; Gvozdenovich y Papparotti (2009) también encontraron una relación significativa entre el agua total hasta el metro de profundidad a la siembra del trigo y rendimiento del cultivo, realizando las mediciones cada 20 cm de profundidad, en lotes de producción. En estos trabajos la fertilización nitrogenada no se tuvo en cuenta como fuente de variación del rendimiento.

El agua que utilizan los cultivos proviene tanto de la acumulada en el suelo al momento de la

siembra como de las precipitaciones que se registran durante el ciclo de crecimiento. En nuestra región el agua que utiliza el trigo es mayormente la acumulada durante el otoño, ya que durante el invierno las precipitaciones son muy escasas.

Los objetivos de este trabajo son relacionar los rendimientos promedios de trigo según precipitaciones otoñales y establecer recomendaciones de fertilización nitrogenada ajustada para distintos escenarios, según régimen pluviométrico otoñal para los principales departamentos trigueros de la provincia de Entre Ríos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron los datos de rendimiento promedio por campaña y lluvias de los departamentos Paraná, Nogoyá, Diamante y Victoria de la provincia de Entre Ríos. Estos departamentos producen cada campaña entre el 50% y 60% del trigo de la provincia de Entre Ríos (SIBER-BCER, 2015a); siendo sus tipos de suelo y relieve, similares.

Para los datos de rendimiento del cultivo de trigo por campaña y departamento se utilizó la base de datos de la Bolsa de Cereales de Entre Ríos (SIBER-BCER, 2015a) y para la información de precipitación mensual se promediaron por departamentos y campañas los datos de 27 centrales meteorológicas (SIBER-BCER, 2015b). Se utilizó toda la información disponible en la BCER, correspondiente a los últimos 15 años (2000 al 2014). Sólo para el departamento Diamante se contó con la información de dos campañas más (1993 y 1999), provista por registros de la Agencia del INTA Diamante.

Para establecer si las recomendaciones de fertilización nitrogenada deberían variar según los milímetros ocurridos en el otoño se tomaron los datos de 17 ensayos de fertilización realizados durante 6 campañas en el departamento Diamante, con DBCA, parcelas de 2.4 metros por 10 metros de largo con tres repeticiones y 3-5 dosis de nitrógeno. Los ensayos se instalaron en campos de productores, con 15-20 kg ha⁻¹ de P agregados a la siembra. Los kilogramos de nitrógeno de nitratos por hectárea se estimaron a partir de los nitratos 0-20 cm del análisis de suelos a la siembra, tomando una densidad aparente del suelo de 1.2 ton m⁻³. El N disponible por hectárea (ND) se calculó a partir de los kg de N de nitrato en el suelo más el N agregado con el fertilizante. El umbral crítico de ND es el nivel a partir del cual el rendimiento de trigo no aumenta y dicho

rendimiento se define como rendimiento objetivo.

El rendimiento se estimó a partir de la cosecha mecánica de 14 m² en cada parcela. Para expresar el rendimiento relativo, en cada bloque, se tomó el tratamiento con mayor dosis de N como 100%. Para los análisis se tomaron los rendimientos promedios para cada tratamiento en cada ensayo.

Los coeficientes del modelo de respuesta lineal-plateau se obtuvieron a través de algoritmos apropiados y su resolución con la subrutina Solver del programa Microsoft® Excel 2007, obteniéndose para los mismos los coeficientes de determinación (r^2) y la significancia (valor p) de los modelos ajustados. Se realizó una prueba de "F" (Mead et al., 1993) para establecer si las respuestas de N disponible (0-20 cm) en rendimiento de

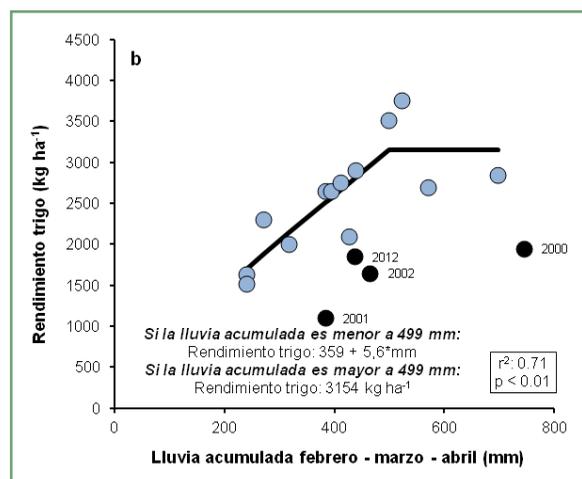
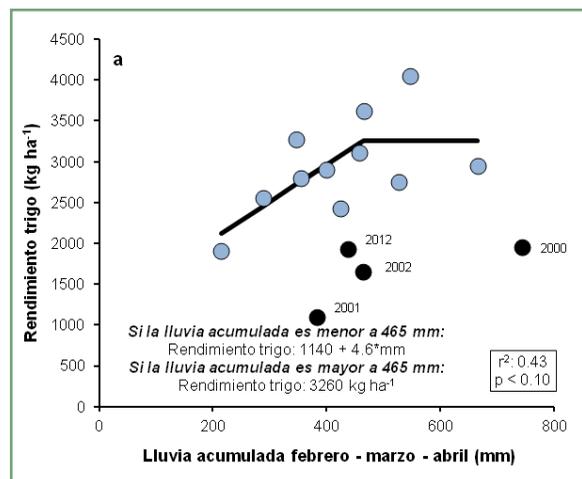


Figura 1. Relación entre lluvias previas a la siembra y rendimiento de trigo; a) Departamentos Paraná, Nogoyá, Diamante y Victoria; b) Departamento Diamante. Los puntos llenos corresponden a años donde la fusariosis de la espiga se presentó como epifitía importante (estos datos no figuran en los modelos).

trigo para los diferentes escenarios productivos eran distintas o podían combinarse en una sola función linear-Plateau. Las pendientes de las regresiones se compararon a partir de una prueba “t” (Wuensch, 2007). Para el análisis de variancia se utilizó el paquete estadístico Infostat 2011 (Di Rienzo et al., 2011)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Lluvias otoñales y rendimiento de trigo en Entre Ríos

Existe relación entre la lluvia acumulada durante febrero – marzo – abril y el rendimiento de trigo, tanto para los cuatro departamentos estudiados como para Diamante; en ambos modelos los umbrales de lluvia acumulada son similares, por encima de dichos umbrales los rendimientos no aumentan debido a limitantes distintas al agua. Si bien se verifica un mejor ajuste y mayor significancia del modelo a medida que disminuimos la región en estudio, los rendimientos promedios y los rendimientos en el umbral no presentan grandes variaciones (**Figura 1 a y b**).

Ensayos de fertilización nitrogenada

En la **Tabla 1** se informan algunas características de cada campaña y de los ensayos de fertilización.

Al relacionar el conjunto de los datos en un solo modelo (**Figura 2**) se encontró una relación significativa con un umbral de nitrógeno disponible (ND) similar al recomendado en la región (Melchiori y Barbagelata, 2002).

Con el objetivo de ajustar la fertilización se proponen dos opciones de manejo: i) la primera es más general, su adopción es sencilla y podría ser utilizada por productores “promedio” en el uso de tecnología del cultivo de trigo; ii) una segunda propuesta requiere un manejo más ajustado del cultivo y podría ser utilizada para productores con un mayor uso de tecnología. Esta segmentación se justifica porque en la primera propuesta el ajuste se establece a partir de los rendimientos promedios y en la segunda los rendimientos son los objetivos (rendimientos en el umbral de ND).

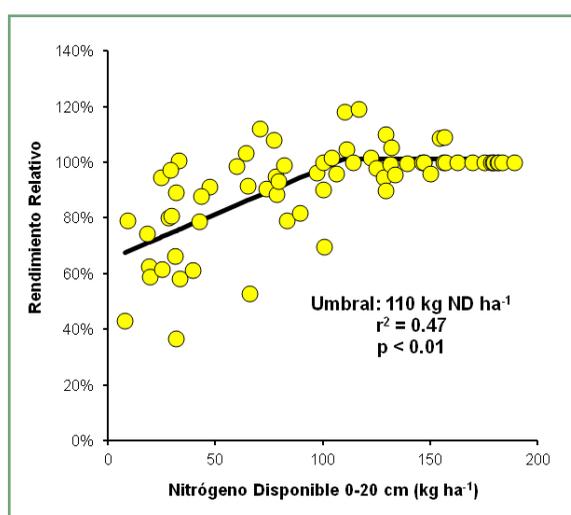


Figura 2. Relación entre el rendimiento relativo de trigo (%) y el nitrógeno disponible (N de nitratos + N fertilizantes), 0-20 cm. Modelo combinado con todos los datos (n = 69).

Tabla 1. Información agronómica y climática de las campañas y ensayos.

Campaña	Lluvias* F-M-A	Nº ensayos	Rendimiento kg ha ⁻¹		Análisis de suelo ppm		Antecesor***	Suelo****
	Mm		Diamante	Ensayo**	NO ⁻³	P Bray I		
2007	697	3	2848	3359	26.1	9.4	S	AV (2) AA (1)
2008	240	1	1640	1850	87.0	13.0	S	AV
2009	499	3	3520	5540	42.9	19.1	S	AA (2) PA (1)
2010	523	2	3763	3909	47.1	6.7	S	AA (1) PA (1)
2013	270	5	2300	2404	41.4	13.6	M (3) S (2)	AV (3) AA (2)
2014	427	3	2100	3909	29.8	20.8	M (1) S (2)	AV (1) AA (2)

*Lluvias: promedio Diamante. **Ensayo: rendimiento promedio. ***Antecesor: S (soja); M (maíz). ****Suelo: AV (Argiudol vértico); AA (Argiudol ácuico); PA (Peluderte árgico crómico).

Primer propuesta de manejo de la fertilización nitrogenada

Tomando como variable de corte el rendimiento promedio del departamento Diamante en las campañas analizadas (alrededor de 2600 kg ha⁻¹), una primera propuesta de manejo de la fertilización nitrogenada es definir dos “ambientes” productivos, por encima y por debajo del promedio. Según el modelo de la **Figura 1 b**, un rendimiento de 2600 kg ha⁻¹ se obtiene con un acumulado de lluvias de alrededor de 400 milímetros.

Para predecir la respuesta del cultivo de trigo al agregado de N los años con lluvias acumuladas por debajo de los 400 mm (**Figura 3 a**) se tomaron los 6 ensayos realizados durante las campañas 2008 y 2013; para las campañas con más de 400 mm acumulados (**Figura 3 b**) se tomaron 11 ensayos, realizados durante los años 2007, 2009, 2010 y 2014.

Al separar los ensayos en los dos grupos definidos se encontró que las funciones ajustadas a ambos set de datos fueron distintas, representando diferentes condiciones de producción y no una misma población. Es decir ambos grupos, separados por diferentes condiciones hídricas, no se pueden representar adecuadamente con una sola función sin aumentar significativamente el error (**Tabla 2**): al pasar de un modelo con dos líneas (**Figura 3 a y b**) a uno con una línea (**Figura 2**), se aumenta significativamente la parte de la variación de los datos no explicada por el modelo (suma de cuadrados del error del modelo, SCE).

En esta primera recomendación se propone, a partir del dato de lluvia acumulada durante los meses de febrero – marzo – abril, llegar a 68 kg ha⁻¹ de ND si las precipitaciones son menores a 400 mm o ajustar a 132 kg ha⁻¹ de ND con más de 400 mm. Estos resultados son coincidentes

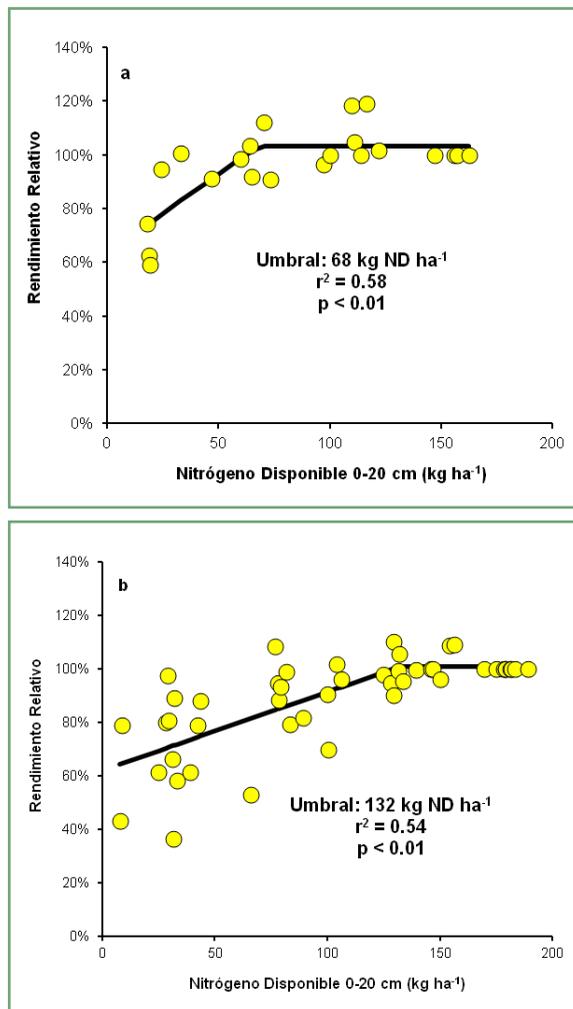


Figura 3. Relación entre el rendimiento relativo en grano (%) y el nitrógeno disponible (N de nitratos + N fertilizantes), 0-20 cm; a) Modelo para campañas con lluvias acumuladas menores a 400 mm; b) Modelo para campañas con lluvias acumuladas mayores a 400 mm.

Tabla 2. Comparación estadística de los modelos.

	SCE	GL	CME	Valor F	Valor p
Modelo rendimientos de trigo lluvias menores a 400 mm	0.19	20			
Modelo rendimientos de trigo lluvias mayores a 400 mm	0.65	45			
Modelo Completo	0.84	65	0,01		
Modelo Combinado	1.03	67			
Diferencia entre Modelos	0.18	2	0,09	7.1	0.002

SCE: suma cuadrado del error. GL: grados de libertad. CME: cuadrado medio del error. F: estadístico.

con Álvarez (2005), quién afirma que el uso de fertilizantes y la respuesta a la fertilización nitrogenada están determinados por la disponibilidad de agua, con respuestas a nitrógeno mayores en ambientes húmedos.

Segunda propuesta de manejo de la fertilización nitrogenada

Tomando los datos de rendimiento objetivo logrados en cada uno de los 17 ensayos se obtuvo la **Figura 4**, este modelo indica el rendimiento que puede alcanzarse con la provisión de N en el umbral crítico en función de los milímetros acumulados en el otoño. En este modelo la eficiencia del uso de cada milímetro de agua acumulado se triplica; en este sentido, García y Berardo (2006) afirman que la mejor nutrición de los cultivos resulta en una mayor eficiencia del uso del agua. Por otro lado, en la **Figura 5** se graficó la relación entre el rendimiento objetivo para cada campaña y su respectivo umbral crítico de ND.

La segunda propuesta de manejo de fertilización nitrogenada consiste en predecir con la **Figura 4** el rendimiento del cultivo de trigo según las precipitaciones acumuladas y en segundo lugar estimar para dicho rendimiento el nivel de ND a alcanzar, utilizando la regresión de la **Figura 5**. Raun y Schepers (2008) también proponen que en condiciones de agua limitante, la estrategia de fertilización nitrogenada debe ser definida en función del agua disponible.

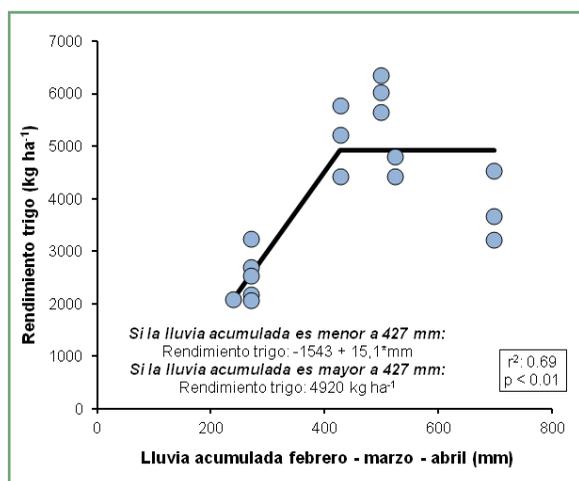


Figura 4. Relación entre lluvias previas a la siembra y rendimiento objetivo de trigo. Cada punto corresponde a un ensayo de fertilización nitrogenada.

Una forma de validar esta segunda recomendación es expresar los kg de ND por hectárea en 0-20 cm informado en la **Figura 5** como ND en 0-60 cm, utilizando la ecuación propuesta por Melchiori y Barbagelata (2002) que estima el contenido de N-NO³ en 0-60 cm a partir de los N-NO³ en 0-20 cm. Los valores de ND (N-NO³ estimados 0-60 cm + N fertilizante) así calculados, se analizaron junto a la información revisada por García y Berardo (2006) de umbrales críticos según rendimientos para distintas zonas de región pampeana Argentina (**Figura 6**). Las pendientes entre ambos set de datos son estadísticamente iguales ($p = 0.39$).

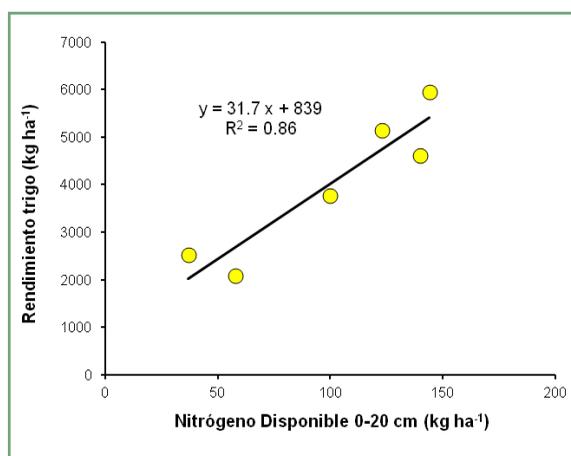


Figura 5. Umbral crítico de ND y rendimiento objetivo de trigo. Cada punto es el obtenido para cada campaña analizada.

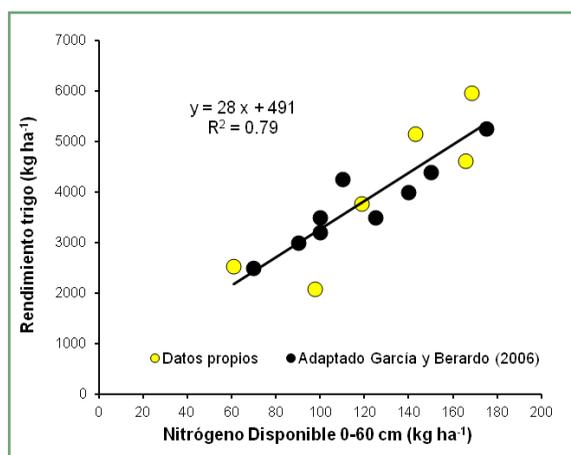


Figura 6. Relación entre los umbrales críticos de nitrógeno disponible (0-60 m) y rendimiento objetivo. Puntos llenos, adaptados de García y Berardo (2006); puntos vacíos, datos propios.

CONCLUSIONES

La lluvia ocurrida antes de la siembra de trigo en Entre Ríos es una de las causas más importantes en la variación de rendimiento del cultivo y por lo tanto de la necesidad de N. En este trabajo se establecen las siguientes relaciones: años con pobres precipitaciones otoñales, que acumulan menos de 400 mm entre los meses de febrero – marzo – abril, deben ser fertilizados con menores cantidades de N y requieren aproximadamente la mitad del ND que los años con buenas precipitaciones otoñales.

Desde otra perspectiva y con un buen ajuste, se logró estimar la producción de trigo según las lluvias previas a la siembra y con este dato de rendimiento objetivo extrapolar la necesidad de N en su umbral crítico.

Un ajuste pendiente de este trabajo está relacionado a estimar, para cada año, la dosis óptima económica de fertilización nitrogenada.

Finalmente, uno de los riesgos que se deben asumir al utilizar estos modelos es la ocurrencia de fusariosis de la espiga, ya que no puede predecirse su aparición en etapas iniciales del cultivo.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, R. 2005. Fertilización de trigo. En Álvarez R. (Coordinador). Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la región pampeana. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Pág. 55-80.
- Barbieri, P., H. Echeverría, y H. Sainz Rozas. 2009. Nitratos en el suelo a la siembra o al macollaje como diagnóstico de la nutrición nitrogenada en trigo en el sudeste bonaerense. *Ci. Suelo (Argentina)* 27(1): 41-47.
- Calviño, P., H.E. Echeverría y M. Redolatti. 2002. Diagnóstico de nitrógeno en trigo con antecesor soja bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *Cien. Suelo* 20:36-42.
- Di Rienzo, J.A.; Casanoves F.; Balzarini M.G.; Gonzalez L.; Tablada M.; Robledo C.W. *InfoStat versión* 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar> (Verificación marzo 2015).
- Ferrari, M., J. Castellarín, H. Sainz Rozas, H. Vivas, R. Melchiori, y V. Gudelj. 2010. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACs. Rosario, 31 de Mayo al 4 de Junio de 2010.
- Fontanetto, H., O. Keller, J. Albrecht, P. Rufino, J. Barsarelli, M. Sillón, L. Belotti, C. Negro, y D. Giailevra. 2009. La importancia del agua edáfica a la siembra como estimador de los rendimientos del trigo en el área central de Santa Fe. *IPNI Informes agronómicos del Cono Sur* N° 41: 9-10.
- García, F., y A. Berardo. 2006. Capítulo 11: Trigo. Pág. 233-253. En H. Echeverría y F. García (eds.). *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Ediciones INTA. Buenos Aires. Argentina.
- García, F. 2011. Presentación: Mercado y uso de fertilizantes en fertilizantes en Argentina. Disponible en [http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/243B459D000C6526852579060062DF63/\\$FILE/FGarcia-%20Univ%20San%20Andres%20-%20Agosto%202011%20%5BCompatibility%20Mode%5D.pdf](http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/243B459D000C6526852579060062DF63/$FILE/FGarcia-%20Univ%20San%20Andres%20-%20Agosto%202011%20%5BCompatibility%20Mode%5D.pdf) (Verificación marzo 2015).
- Gvozdenovich, J., y O. Paparotti. 2009. Relación entre el agua edáfica a la siembra y el rendimiento del cultivo de Trigo en diferentes departamentos de la provincia de Entre Ríos. Disponible en <http://inta.gov.ar/documentos/relacion-entre-el-agua-edafica-a-la-siembra-y-el-rendimiento-del-cultivo-de-trigo-en-diferentes-departamentos-de-la-provincia-de-entre-rios/> (Verificación marzo de 2015)
- Hoffman E., C. Perdomo, O. Ernst, M. Bordoli, M. Pastorini, C. Pons, y E. Borghi. 2002. Propuesta para el manejo del nitrógeno en cultivos de invierno en Uruguay. Disponible en [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/D94914332DFCFA658525798400580E8A/\\$FILE/13.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/D94914332DFCFA658525798400580E8A/$FILE/13.pdf) (Verificación marzo de 2015)
- Martínez, J.M., J.A. Galantini, M. Duval, F. López, M.R. Landriscini, y D. Huespe. 2014. Momentos de fertilización de trigo en un suelo del sudoeste bonaerense. Actas XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo II Reunión Nacional "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas" Producción sustentable en ambientes frágiles Bahía Blanca, 5 al 9 de mayo de 2014.
- Mead, R., R.N. Curnow, y A.M. Hasted. 1993. *Statistical methods in agriculture and experimental biology*. Chapman and Hall, London, 415p.
- Melchiori, R.J.M., y P.A. Barbagelata. 2002. Recomendación de Fertilización Nitrogenada en Trigo. Actualización Técnica en Trigo. INTA EEA Paraná. Serie de Extensión N° 22. 33-38p
- Melchiori, R.J.M., J.M. Pautasso, S. Albarenque, y A. Kemmerer. 2011. Fertilización nitrogenada en trigo según zonas de manejo. Jornada regional de cultivos de invierno campaña 2011. Isbn 978-950-698-268-3. Pág. 47-53.
- Schleger, A., C. Grant y J. Havlin. 2005. Challenging Approaches to Nitrogen Fertilizer Recommendations in Continuous Cropping Systems in the Great Plains. *Agronomy journal* 97: 391-398.
- SIBER-BCER. 2015a. Estadísticas "Consulta on-line de datos". <http://www.bolsacer.org.ar/Fuentes/estadisticas.php> (Verificación marzo de 2015).
- SIBER-BCER. 2015b. Red Pluviométrica. "Consulta on-line de datos". <http://centrales.bolsacer.org.ar/pluviometros/> (Verificación marzo de 2015).
- Raun, W., y J. Schepers. 2008. 17. Nitrogen Management for improved use efficiency. En *Nitrogen in agricultural systems*, Agronomy Monograph 49. Society of American. Pag. 675-693.
- Reussi Calvo, N., H. Sainz Rozas, H.E. Echeverría. A. Berardo, y N. Diovisalvi. 2013. ¿El Nan mejora el diagnóstico de nitrógeno en trigo? *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, N° 10: 10-16. Disponible [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/D8973CE58A06199085257B83005D1F03/\\$FILE/10.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/D8973CE58A06199085257B83005D1F03/$FILE/10.pdf) (Verificación marzo de 2015).
- Urquiaga, S. C.P. Jantalia, B.J.R. Alves, y R.M. Boddey. 2004. Importancia de la FBN en el secuestro de carbono en el suelo y en la sustentabilidad agrícola. En: *Biología del Suelo. Transformación de la materia orgánica. Usos y biodiversidad de los organismos edáficos*. Eds. Monzón de Asconegui, MA; García de Salamone, IE; Miyazaki, SS. Editorial FAUBA. Universidad de Buenos Aires. Pág. 1-6.
- Wuensch, K.L. 2007. Comparing correlation coefficients, slopes and intercepts, 4 page. <http://core.ecu.edu/psyc/wuenschk/docs30/comparecorrcoeff.pdf>

[volver al índice](#)

Delimitación de zonas de manejo: una herramienta para mejorar el manejo de nitrógeno en trigo

Nahuel Peralta^(1,2); José Luis Costa^(2,4); Tomas Gowland⁽³⁾; Matias Ruffo⁽⁵⁾; y Donald Bullock⁽⁶⁾

⁽¹⁾ CONICET; ⁽²⁾ Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Mar del Plata (FCA-UNMdP); ⁽³⁾ AACREA; ⁽⁴⁾ Estación Experimental INTA- Balcarce; ⁽⁵⁾ Bioceres; ⁽⁶⁾ Universidad de Illinois
Contacto: nperalta21@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Los efectos de la fertilización nitrogenada sobre el cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.) en el Sudeste Bonaerense han sido ampliamente estudiados (García et al., 1998; Calviño et al., 2002; González Montaner et al., 2003; Barbieri et al., 2012). Sin embargo, es necesario reconocer que ninguna de estas investigaciones ha considerado la variabilidad espacial del suelo a escala de lote. Los lotes agrícolas del Sudeste Bonaerense presentan variación en la textura del suelo, contenido de materia orgánica, profundidad de suelo, topografía y disponibilidad de agua para los cultivos (Peralta et al., 2013a; Peralta et al., 2013b), generando variabilidad espacial en la disponibilidad de nitrógeno (N), el potencial de rendimiento y así, posiblemente en la respuesta a la fertilización nitrogenada en el cultivo de trigo (Peralta et al., 2015a). Dadas estas condiciones, es esperable que el efecto combinado de las características de suelo-terreno, y condiciones ambientales generen interacciones complejas en las relaciones suelo-planta y produzcan variaciones espaciales en el rendimiento, y en la respuesta al agregado de N en el cultivo trigo.

A partir de las últimas décadas se ha impulsado el desarrollo y la utilización de los Sistemas de Información Geográficos (SIG) y los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) que dieron lugar al surgimiento de la Agricultura de Precisión (AP). Pierce y Nowak (1999) la definen como la aplicación de tecnologías y principios para manejar la variabilidad espacial y temporal asociada con los aspectos de la producción agrícola, con el propósito de mejorar el rendimiento de los cultivos y la calidad ambiental. La AP requiere información detallada sobre las características espacio-temporal de suelo y cultivo dentro de los lotes de producción para delimitar zonas de manejo (ZM), definidas como una subdivisión de los lotes en áreas homogéneas para aplicar manejo diferencial en función de las características y

propiedades edáficas de cada zona por medio de la incorporación de la tecnología de Manejo Sitio Específico (MSE) (Bullock et al., 2007), con las metas de aumentar el rendimiento de los cultivos, la eficiencia en el uso de los insumos, y aumentar el retorno económico al productor (Ruffo et al., 2006; Bullock et al., 2007). Los objetivos de esta investigación fueron: (I) determinar la interacción entre zonas de manejo y fertilización nitrogenada sobre el rendimiento del cultivo de trigo; y (II) determinar si la delimitación de zonas de manejo mejora la eficiencia en el uso de N.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

Esta investigación fue conducida en 5 lotes comerciales entre 26 y 84 ha, ubicados en el sudeste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. Cada lote está constituido principalmente por una serie de suelo (**Tabla 1**) [INTA Castelar (1979-1980) Mapa de suelos de la Provincia de Buenos Aires (1:50000), Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca].

Medición de las variables para generar zonas de manejo

La medición de la Conductividad Eléctrica Aparente del suelo (CEa) se realizó utilizando el Veris 3100® (Veris 3100, Division of Geoprobe Systems, Salina, KS) (Peralta et al., 2012; Peralta y Costa, 2013). En este trabajo se utilizaron las mediciones de ambos estratos de CEa (0-30 cm, CEa30 y de 0-90 cm, CEa90) (**Figura 1a**). La medición de la elevación del terreno se realizó en el mismo momento que la medición de la CEa con un DGPS (**Figura 1b**). La profundidad de suelo fue medida con un penetrómetro hidráulico Giddings en una grilla de 30x30 m y georreferenciando cada punto con un GPS (Juno ST; Trimble Navigation Limited, USA).

Rendimiento en grano

Los datos de rendimiento en grano del cultivo de trigo fueron medidos y registrados utilizando un monitor de rendimiento comercial acoplado a una cosechadora equipada con un DGPS. Además fueron filtrados utilizando el software comercial Yield Editor (Sudduth y Drummond, 2007). Los datos de rendimiento de trigo fueron registrados cada segundo y se corrigieron a 14% de humedad del grano.

Variabilidad espacial de la CEa, elevación, profundidad del suelo y rendimiento de grano de trigo

La estructura de variabilidad y correlación espacial de la CEa, elevación del terreno, profundidad de suelo y rendimiento dentro de los lotes fue cuantificada con semivariogramas (Isaaks y Srivastava, 1989). Posteriormente, se procedió a la interpolación de todas las capas de datos con el procedimiento Kriging Ordinario, generando una grilla de 10x10 m (Peralta et al., 2013a; Peralta y Costa et al., 2013), utilizando la herramienta análisis geoespacial de ArcGIS 10.2 (ArcGIS v10.2, Environmental System Research Institute Inc. (ESRI), Redlands, CA, USA).

Delimitación de zonas de manejo

La delimitación de zonas de manejo se realizó utilizando como variables de entrada a la CEa30, CEa90, elevación del terreno y profundidad de suelo, mediante el software Management Zone Analyst (Fridgen et al., 2004). Este software realiza la división de ambientes (zonas) mediante un análisis cluster (fuzzy K-means) (Peralta et al., 2015a, b).

Diseño experimental y dosis de nitrógeno

Se utilizó un diseño experimental de bloques completos aleatorizados entre 5 y 12 repeticiones en cada ZM (**Figura 2**). Se utilizó un número diferente de repeticiones en cada ZM dentro de un lote, en función de las formas y tamaño de las ZM. Las dimensiones de las parcelas fueron de 70 m de largo y 30 m de ancho. El diseño espacial de los experimentos (es decir, el plano del terreno / dosis N) fue desarrollado con las ArcGIS 10.2 (ArcGIS v10.2, Environmental System Research Institute Inc. (ESRI), Redlands, CA, USA). La aleatorización de las dosis a cada unidad experimental se realizó con el procedimiento PLAN de SAS (SAS Institute 2003).

Las dosis de N fueron aplicadas con un aplica-

dor variable comercial equipado con un DGPS. El formulado aplicado fue UAN (32% de N) al momento de macollaje. Cada parcela recibió una dosis de fertilizante N, por encima o igual a una dosis de referencia. En el sudeste de la provincia de Buenos Aires, la dosis de fertilizante de referencia o común de N (Nf) que la mayoría de los productores utilizan es $Nf = CT - x$, donde Nf = fertilización con N, CT = umbral crítico de N disponible a la siembra (125 Kg N ha^{-1} para rendimientos $<4500 \text{ kg ha}^{-1}$; 170 kg N ha^{-1} para rendimientos entre 6000 a 7000 kg ha^{-1}) (García et al., 1998; Calviño et al., 2002; Barbieri et al., 2012), y x es la disponibilidad de N-nitratos a 0-60 cm de profundidad a la siembra. Las dosis de N aplicadas fueron un control (0N), $125 - x$ (dosis de referencia) y $170 - x$.

Para cada ZM se calculó la eficiencia de utilización del fertilizante (EUNFert) por el cultivo de trigo ($\text{kg de grano kg de fertilizante aplicado}^{-1}$) como la diferencia entre el rendimiento obtenido del tratamiento fertilizado (RtoN) y testigo (Rto Test) dividido la dosis aplicada ($[(RtoN - RtoTest) / \text{Dosis N}]$). Además, se realizó un análisis global para calcular la eficiencia de utilización de N disponible (EUND, suelo+fertilizante) del cultivo de trigo entre tipos de suelo (asociados a las zonas de manejo).

Para comparar los tratamientos de fertilización considerando la ZM en la que fueron aplicados, se ajustó para el rendimiento parcelario un Modelo Lineal Mixto (MLM) con correlación espacial (Peralta et al., 2015a, b).

Muestreo de suelos y datos de precipitación

La determinación del contenido de $N\text{-NO}_3$ se realizó hasta los 60 cm de profundidad en capas de 20 cm al momento de la siembra (Bremner y Keeney, 1966), extrayendo una muestra compuesta por 20 submuestras en cada lote. Los valores de $N\text{-NO}_3$ a la siembra son mostrados en la **Tabla 1**. En todos los lotes se emplearon las técnicas de manejo usuales de los productores de cada área y los ensayos se condujeron sin deficiencias de P y S. Los datos de precipitaciones del experimento y del promedio histórico en el ciclo del cultivo fueron obtenidos del establecimiento donde se realizó el ensayo (**Figura 3**). Se realizó un balance hídrico para el cultivo de trigo, adaptando el modelo de Della Maggiora et al. (2003). Las variables de entrada fueron medidas por la estación meteorológica de la Unidad Integrada INTA-FCA Balcarce. Los Kc utilizados fueron obtenidos de tabla (Allen et al., 1998).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Zonas de manejo y dosis de N

En los lotes FB, FE and F25, la interacción entre dosis de N y ZM fue significativa ($p < 0.05$), lo que indica que la respuesta a la fertilización difiere entre ZM (**Figura 4**). Mediante el análisis de los tres casos (FB, FE y F25), se observó que en el lote FB, en la zona BP (baja productividad) (**Tabla 2**), las dosis de N (61 y 106 kg ha^{-1}) no presentaron diferencias significativas en el rendimiento entre sí, pero ambas difirieron significativamente con el tratamiento control (0N). En la zona de BP, las dosis de N (61 y 106 kg N ha^{-1}) mostraron una respuesta del rendimiento de 549 kg ha^{-1} (18%) y 580 kg ha^{-1} (16%), respectivamente. En la zona de MP (media productividad), los incrementos en rendimiento fueron de 670 kg ha^{-1} (20%) y 850 kg ha^{-1} (23%), respectivamente. En la zona de AP (alta productividad), el rendimiento aumentó en 543 kg ha^{-1} (17%) y 864 kg ha^{-1} (24%), respectivamente. En el lote FE, en la zona de BP y MP, la adición de N no aumentó significativamente el rendimiento, mientras que en la zona de AP, el aumento fue significativo. En la zona de BP, las dosis de N (47 y 94 kg N ha^{-1}) mostraron una respuesta de 130 kg ha^{-1} (3.85%) y 180 kg ha^{-1} (5%), respectivamente. En la zona de MP, el rendimiento aumentó 60 kg ha^{-1} (1%) y 130 kg ha^{-1} (4%), respectivamente. En la zona de AP, sin embargo, el incremento en rendimiento fue de 200 kg ha^{-1} (5%) y 410 kg ha^{-1} (10%), respectivamente. En F25, en las zonas de BP y AP, las dosis de N (53 y 98 kg N ha^{-1}) no produjeron diferencias significativas de rendimiento entre sí, pero generaron diferencias con el control (0 N). En la zona de BP, las dosis de N (53 y 98 kg N ha^{-1}) mostraron una respuesta del rendimiento de 240 kg ha^{-1} (8%) y 280 kg ha^{-1} (9%), respectivamente. La zona de AP, sin embargo, produjo un aumento de 600 kg ha^{-1} (18%) y 700 kg ha^{-1} (20%), respectivamente. En estos tres sitios, la zona de AP presentó las mayores respuestas a la fertilización nitrogenada (**Figura 4**). Esta zona estuvo asociada a las áreas más bajas del terreno y suelos profundos (**Tabla 2**), lo cual pudo haber permitido la acumulación de agua y mejores condiciones de humedad (Peralta et al., 2013b). Como consecuencia, el cultivo de trigo presentó un menor estrés hídrico y mayores respuestas a la fertilización nitrogenada, comparado con la zona de BP (**Tabla 3**). Por el contrario, la zona de BP se asoció con áreas de mayor elevación del terreno y suelos poco profundos (someros), una

menor disponibilidad de agua y mayor estrés hídrico (**Tabla 3**). Es de suponer que la respuesta del cultivo a la fertilización nitrogenada estuvo limitada por dicho estrés (Barbieri et al., 2012). Peralta et al., (2015b), trabajando en el mismo año experimental, con los mismos tipos de suelo (Argiudoles típicos y Paleudoles Petrocalcicos), encontraron una interacción significativa entre dosis de N y ZM para el cultivo de cebada (*Hordeum vulgare*), lo que indica que la respuesta de los cultivos a la fertilización nitrogenada varía entre ZM (Ruffo et al., 2006). En los lotes F11 y FA, la interacción entre dosis de N \times ZM no fue estadísticamente significativa (**Figura 4**). En F11, la dosis de N no produjo diferencias significativas en el rendimiento, ya sea entre o dentro de las ZM. Estos resultados podrían ser debido a una diferencia mínima en profundidad del suelo y la disponibilidad de agua entre ZM (**Tabla 2**).

La interacción entre la disponibilidad de N y ZM para todos los lotes en conjunto fue presentada en la **Figura 5**. En este análisis, la zona de bajo potencial (BP) estuvo asociada a suelos poco profundos (Paleudoles Petrocálculos -PP-; $< 100 \text{ cm}$). Mientras la zona de alto potencial (AP) estuvo asociada a suelos profundos (Argiudoles Típicos-AT; $> 100 \text{ cm}$) (**Tabla 2**). Para PP y AT, la interacción entre N disponible \times ZM fue significativa ($p < 0.05$), lo que indica que la respuesta a la fertilización es diferente entre tipos de suelo (**Figura 5**). Para PP y AT, las disponibilidades de N más altas (125 y 170 kg N ha^{-1}) no presentaron significativamente diferencias en los aumentos de rendimiento, pero sí con el control (80 kg N ha^{-1}). En los PP, las disponibilidades de N (125 y 170 kg N ha^{-1}) mostraron una respuesta de rendimiento de 250 kg ha^{-1} (8%) y 320 kg ha^{-1} (10%), respectivamente. Mientras que en los AT, las disponibilidades más altas de N presentaron un aumento de 390 kg ha^{-1} (11%) y 470 kg ha^{-1} (14%), respectivamente. Estos resultados demuestran que, el cultivo de trigo en años de baja precipitación, presentó la menor respuesta en los Paleudoles Petrocálculos y la mayor respuesta en los Argiudoles Típicos.

En los lotes FA y F11, la EUNfert no difirió entre ZM (**Figura 6**). Por el contrario, en FB, FE y F25, la EUNfert difirió significativamente entre ZM ($p < 0.05$), con mayores valores de EUNfert en la zona de AP (**Figura 6**). Esto es atribuible a que esta zona presenta mayor disponibilidad de agua y el cultivo de trigo presentó menor estrés hídrico durante la estación de crecimiento (**Tabla 3**). En el lote FB, el valor de EUNfert para la dosis de 61 N

fue de 9, 8.8 y 11 kg de grano por kg de N aplicado en la zona de BP, MP y AP, respectivamente. Para la dosis de 106 N, el valor de EUNfert fue de 5,5, 8 y 8.2 kg de grano por kg de N aplicado en la zona de BP, MP y AP, respectivamente. En el lote FE, el valor de EUNfert para la dosis de 47 N fue de 2,7, 1,3 y 4,3 kg de grano por kg de N aplicado en la zona de BP, MP y AP, respectivamente. Para la dosis de 92 N, la EUNfert fue de 2.1, 1.4 y 3 kg de grano por kg de N aplicado en la zona de BP, MP y AP, respectivamente. En F25, el valor de EUNfert para la dosis de 53 N fue de 7 y 11 kg de grano por kg de N aplicado en la zona de BP y AP, respectivamente. En contraste, para la dosis de 98 N, la EUNfert fue de 3 y 6 kg de grano por kg N aplica para BP y AP, respectivamente. Barbieri et al. (2008) y Velasco et al. (2012), encontraron valores similares de EUNfert, pero no identificaron ZM. Estos autores mencionaron que los valores bajos de EUNfert pueden atribuirse a un estrés hídrico durante la estación de crecimiento, ya que en años sin estrés hídrico, los valores de EUNfert fueron mayores. Para todos los lotes, la EUN disponible difirió significativamente entre el tipo de suelo ($p < 0.05$), con valores mayores de EUN en AT (**Figura 7**). El valor EUN para 125 kg ha⁻¹ de N disponible fue de 7 y 9 kg de grano por kg de N para PP y AT, respectivamente. En contraste, para 170 kg de ha⁻¹ N disponible, la EUN fue de 5 y 6.5 kg de grano por kg de N para PP y AT, respectivamente.

Los resultados muestran la importancia de identificar ZM y tipos de suelo para mejorar el manejo de N. La aplicación de dosis variable de N, de acuerdo con el potencial de cada tipo de suelo, permite una mayor eficiencia en el uso de este nutriente, disminuyendo los riesgos de pérdida de N y, en consecuencia, la probabilidad de contaminar el medio ambiente, favoreciendo los sistemas de producción sustentables.

CONCLUSIONES

En Argiudoles Típicos y Paleudoles Petrocálcos, la aplicación de herramientas de AP, como la conductividad eléctrica aparente, atributos topográficos y mapas de rendimiento, permitieron detectar la variabilidad espacial de los suelos a escala de lote. La dosis de fertilización nitrogenada varió entre ZM, y delimitar ZM mejoró la EUN. Esto justifica la aplicación de dosis variable de N, con el fin de minimizar el riesgo de contaminación del medio ambiente provocada por el uso

excesivo de N.

Se debe tener en cuenta que estas conclusiones son preliminares ya que son producto de cinco sitios experimentales y de un solo año de estudio, y no cubre el rango de todas las condiciones posibles. Creemos que es necesario contar en el futuro con mayor cantidad de escenarios para validar el modelo propuesto, lo que está contemplado en el trabajo de postdoctoral del primer autor y datos afines.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los productores y asesores del grupo CREA por su ayuda en la recopilación de los datos en los campos donde se realizó el estudio. El experimento se llevó a cabo con fondos del Proyecto INTA, AEAI3722. Al mismo tiempo, nos gustaría expresar nuestro agradecimiento a CONICET.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, RG; LS Pereira; D Roes y M Smith.** 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. FAO: Irrigation and drainage 56: 1-300.
- Barbieri, P.A.; Echeverría, H.E.; Sainz Rozas, H.R.** 2008. Time of nitrogen application affects nitrogen use efficiency of wheat in the humid pampas of Argentina. *Can. J. Plant Sci.* 88, 849-857.
- Barbieri, P.A.; Echeverría, H.E.; Sainz Rozas, H.R.** 2012. Alternatives for Nitrogen Diagnosis for Wheat with Different Yield Potentials in the Humid Pampas of Argentina. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 43:1-11.
- Bremner, J.M.** 1965. Inorganic forms of nitrogen. In Black CA (ed). *Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy Monogr. no. 9.* ASA, Madison, WI. pp 1179-1237.
- Bullock, D.S., N. Kitchen, y D.G. Bullock.** 2007. Multidisciplinary teams: A necessity for research in precision agriculture systems. *Crop Sci* 47: 1765-1769.
- Calviño, P.A., H.E.Echeverría, y M. Redolatti.** 2002. Diagnóstico de nitrógeno en trigo con antecesor soja bajo siembra directa en el sudeste Bonaerense. *Ciencia del Suelo* 20, 36-42.
- Della Maggiora, A.I., A. Irigoyen, J.M. Gardiol, O. Caviglia, L. Echarte.** 2003. **Evaluación de un modelo de balance de agua** en el suelo para el cultivo de maíz. *Rev. Arg. Agrometeor* 2(2):167-176.
- Dinnes, D.L., D.L. Karlen, D.B. Jaynes, T.C. Kaspar, J.L. Hatfield, T.S. Colvin, y C.A. Cambardella.** 2002. Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in tile-drained Midwestern soils. *Agron. J* 94:153-171.
- ESRI.** 2009. ARCGIS 10.2. Geospatial analyst tool. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- García, F.O., K.P. Fabrizzi, A. Berardo, F. Justel. 1998.

Fertilización nitrogenada de trigo en el sudeste bonaerense: Respuesta, fuentes y momentos de aplicación. Actas Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 16. Carlos Paz, 4-7 Mayo 1998. AACs. Carlos Paz, Córdoba, Argentina.

González Montaner, J., M. Di Nápoli, P. Calviño, N. Mailland, M. Posborg, F. Dodorico, J. Andenoché. 2003. Nitrógeno en trigo. Revista de los CREA. 272:56-59.

Fischer, R.A. 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. J. Agric. Sci. (Cambridge), 105: 447-61.

Fridgen, J.J., N.R. Kitchen, K.A. Sudduth, S.T. Drummond y C.W. Fraisse. 2004. Management zone analyst (MZA): software for subfield management zone delineation. Agron. J 96: 100-108.

INTA. CIRN. Instituto de Suelos. Hoja - —3760-35 —ClarazIII, PBA, Castelar: Instituto de Suelos AICET, 1970. 72 p, 4 fotocartas, escala 1:50.000.

Isaaks, E.H., R.M. Srivastava. 1989. An introduction to applied geostatistics. New York, NY: Oxford University Press. 561 p.

Peralta, N.R., Barbieri, P., Gowland, T., Aparicio, V., y Costa, J.L. 2015b. Agricultura de precisión: dosis variable de nitrógeno en cebada cervecera. Ciencia del suelo. Aceptado.

Peralta, N.R., Costa, J.L. 2013. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. Computers and Electronics in Agriculture. 99: 218-226.

Peralta, N.R., Costa, J.L., Balzarini, M., Castro Franco, M., Córdoba, M., Bullock, D. 2015a. Delineation of management zones to improve nitrogen management of wheat. Computers and Electronics in Agriculture. 110: 103-113

Peralta, N.R., Costa, J.L., y Castro Franco, M. 2012. Interpretación de la conductividad eléctrica aparente

para la delimitación de zonas de manejo en el sudeste bonaerense. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica. pp. 15-19.

Peralta, N.R., J.L. Costa, M. Balzarini y Castro Franco, M. 2013b. Delimitación de zonas de manejo con modelos de elevación digital y profundidad de suelo. Interciencia 38 (6): 1-7.

Peralta, N.R., J.L. Costa, M. Balzarini y H. Angelini. 2013a. Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the southeastern pampas. Can. J. Soil Sci 93: 205-218.

Pierce, F.J., y Nowak, P. 1999. Aspects of precision agriculture. p 1-85. "In" D. Spark (Ed) Advance in Agronomy. 67. Academic Press.

Ruffo, M., G. Bollero, D.S. Bullock, D.G. Bullock. 2006. Site-specific production functions for variable rate corn nitrogen fertilization. Precis. Agric 7, 327-342.

SAS Institute. 2002. SAS User's Guide. Statistical Analysis System Institute Inc. Cary, NC.

Sudduth, K.A., and S.T. Drummond. 2007. Yield Editor: Software for Removing Errors from Crop Yield Maps. Agron. J. 99, 1471-1482

Velasco J.L., H. Sainz Rozas, H. Echeverría, P. Barbieri. 2012. Optimizing fertilizer nitrogen use efficiency by intensively managed spring wheat in humid regions: Effect of split application. Can. J. Plant Sci. 92:847-856.

Veris Technologies. 2001. Frequently asked questions about soil electrical conductivity. <http://www.veristech.com>. Veris Technologies, Salina. KS. Acceso 25 de noviembre de 2013. ■

Tabla 1. Sitios experimentales y clasificaciones de suelo (INTA, 1970, el INTA, 1989).

Sitio	Lotes	Sup (ha)	** N-NO ₃ (kg ha ⁻¹)	Tipo de suelo		
				* UC	Series suelo	Clasificación suelo
Tandil	FA	45	80	Ta19	Tandil (70%)	Argiudol Típico
					Azul (30%)	Paleudol Petrocalcico
	FB	26	84	Ta19	Tandil (70%)	Argiudol Típico
					Azul (30%)	Paleudol Petrocalcico
La Numancia	FE	33	80	Ta19	Tandil (70%)	Argiudol Típico
					Azul (30%)	Paleudol Petrocalcico
Loberia	F11	75	87	AZ26	Azul (60%)	Paleudol Petrocalcico
					Semillero Buck (30%)	Argiudol Típico
					Cinco Cerros (10%)	Argiudol Lítico
	F25	84	83	AZ26	Azul (60%)	Paleudol Petrocalcico
					Semillero Buck (30%)	Argiudol Típico
					Cinco Cerros (10%)	Argiudol Lítico

* Unidad cartográfica. ** Concentración de nitratos a la siembra

Tabla 2. Conductividad eléctrica aparente (CEa30 y CEa90), elevación, profundidad de suelo y rendimiento dentro las zonas de manejo en cada lote.

Sitio	Lote	Zona	CEa30 (mS m ⁻¹)	CEa90 (mS m ⁻¹)	Elevación (m)	PS (cm)	Rendimiento (t ha ⁻¹)
Tandil	FA	BP	19.9 a*	20.7 a	197.2 a	80.6 b	3.64 b
		AP	19.6 a	21.1 a	192.5 b	90.5 a	3.92 a
	FB	BP	18.4 a	19.2	204.0 a	60.1 c	3.5b
		MP	18.0 a	19.5	198.7 b	75.4 b	3.7 ab
		AP	18.1 a	19.0	193.2 c	85.8 a	3.9 a
La Numancia	FE	BP	20.7 a	21.8 a	276.2 a	69.9 c	3.5 b
		MP	16.4 b	16.8 b	261.7 b	93.4 b	3.7 b
		AP	17.1 b	16.8 b	250.7 c	132.2 a	4.2 a
Lobería	F11	BP	27.1 a	27.8 a	152.3 a	67.2 a	2.9 a
		AP	25.5 a	26.6 a	152.2 a	59.6 a	3.0 a
	F25	BP	24.1 a	27.3 a	160.7 a	80.8 b	3.3 b
		AP	19.2 b	23.7 b	161.2 a	98.1 a	3.8 a

BP: baja productividad, MP: media productividad, AP: alta productividad. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre zonas de manejo para cada lote. PS: profundidad de suelo

Tabla 3. Déficit de agua promedio en la estación de crecimiento del cultivo de trigo.

Lote	Zona	Déficit agua*
FA	BP	164
	AP	126
FB	BP	172
	MP	166
FE	AP	132
	BP	168
F11	MP	158
	AP	121
F25	BP	176
	AP	180
	BP	159
	AP	107

* Déficit de agua durante el período crítico para determinar el rendimiento en grano de trigo. El período crítico se define de la siguiente manera: 20 días previo y 10 días después de antesis (Fischer, 1985).

BP: baja productividad, MP: media productividad, AP: alta productividad.

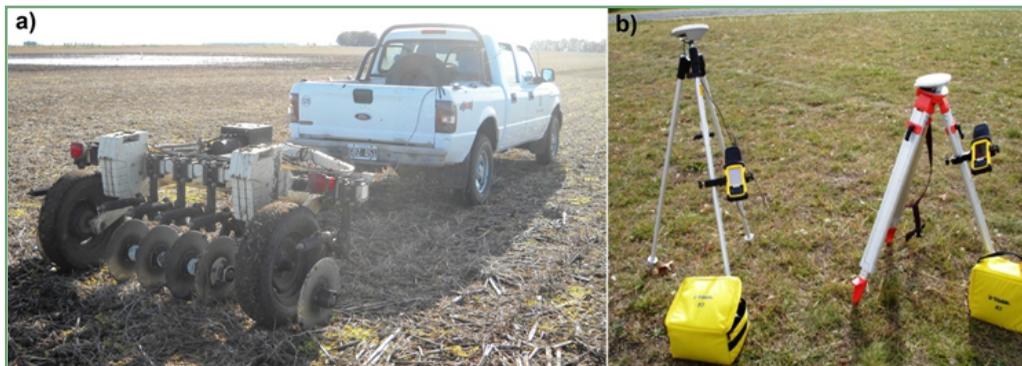


Figura 1. a) Medición de la conductividad eléctrica del suelo con la rastra Veris 3100, b) Medición de la elevación del terreno con DGPS

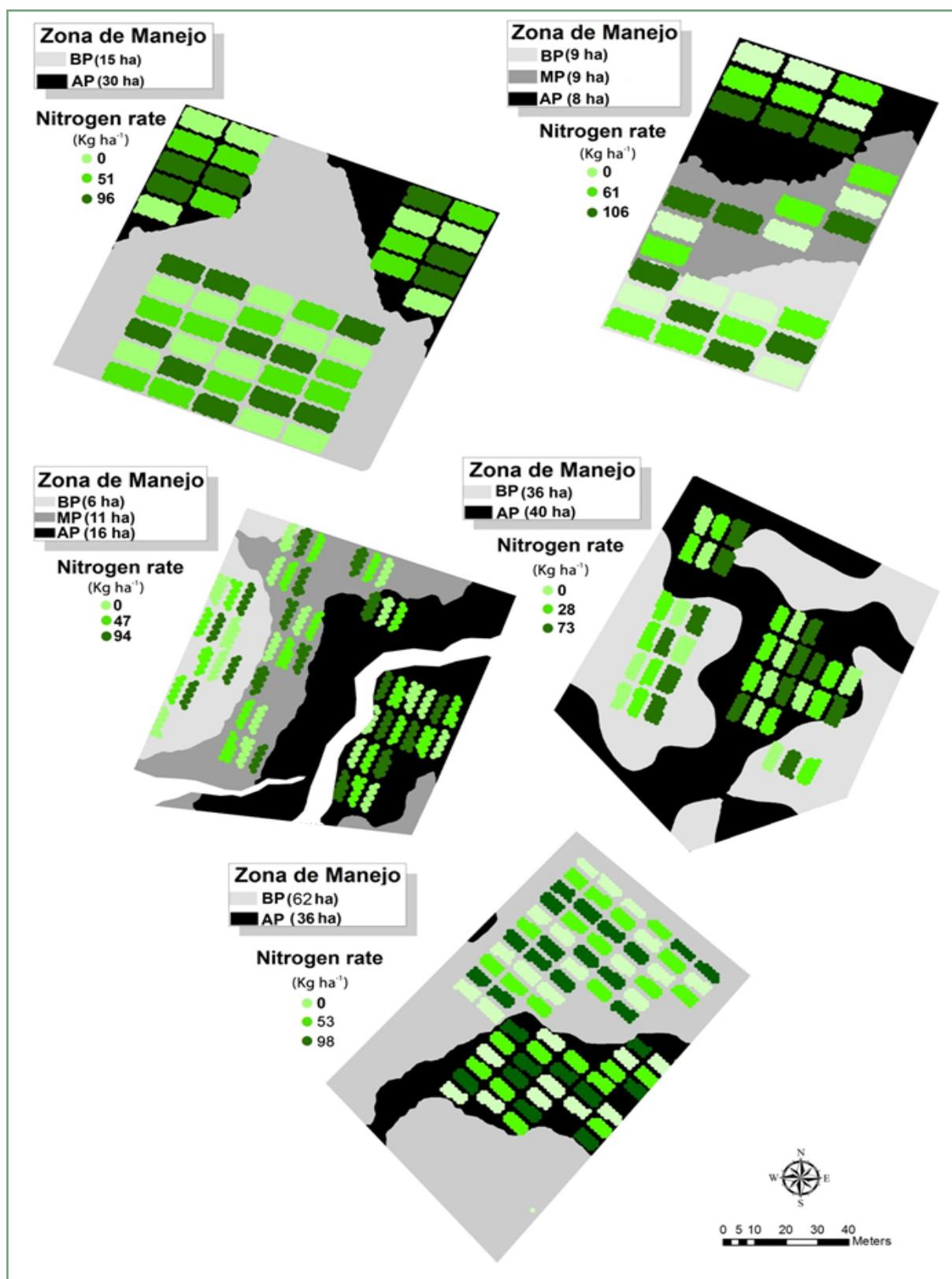


Figura 2. Lotes experimentales con las zonas de manejo y parcelas con diferentes dosis de N.

BP: baja productividad, MP: media productividad, AP: alta productividad.

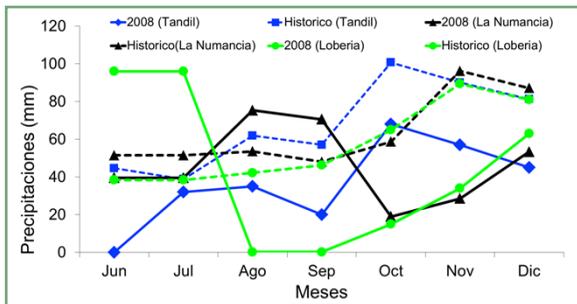


Figura 3. Déficit de agua promedio en la estación de crecimiento del cultivo de trigo.

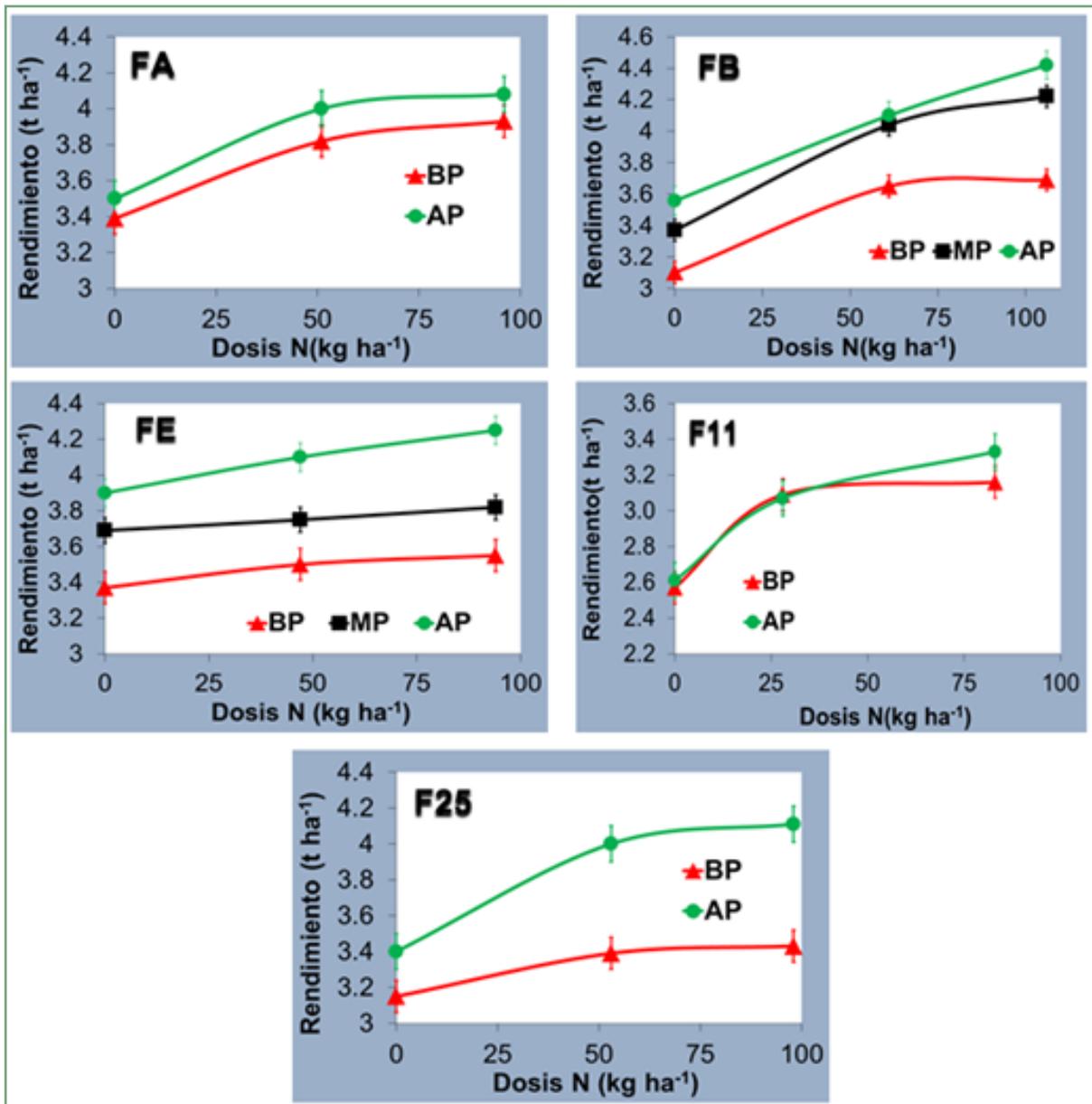


Figura 4. Diferencias en el rendimiento promedio de diferentes dosis de N y zonas de manejo. Las barras verticales indican el error típico de la media para cada zona de manejo.

BP: baja productividad, MP: media productividad, AP: alta productividad.

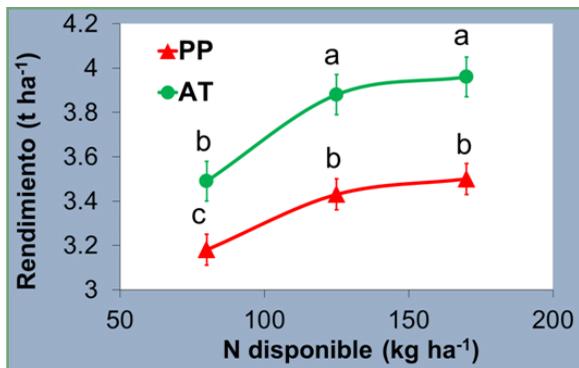


Figura 5. a) Relación entre el rendimiento de trigo y el nitrógeno disponible (ND) a la siembra (fertilizante + suelo) hasta los 60 cm de profundidad según tipo de suelo, Paleudol Petrocalcico (PP) y Argiudol Típico (AT). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$). Las barras verticales indican el error típico de la media para cada tipo de suelo.

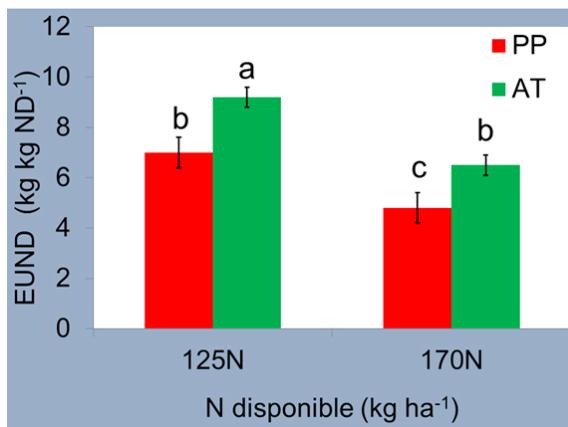


Figura 7. Eficiencia del uso de nitrógeno disponible (EUN) según tipo de suelo, Paleudol Petrocalcico (PP) y Argiudol Típico (AT). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$). Las barras verticales indican el error típico de la media para cada tipo de suelo.

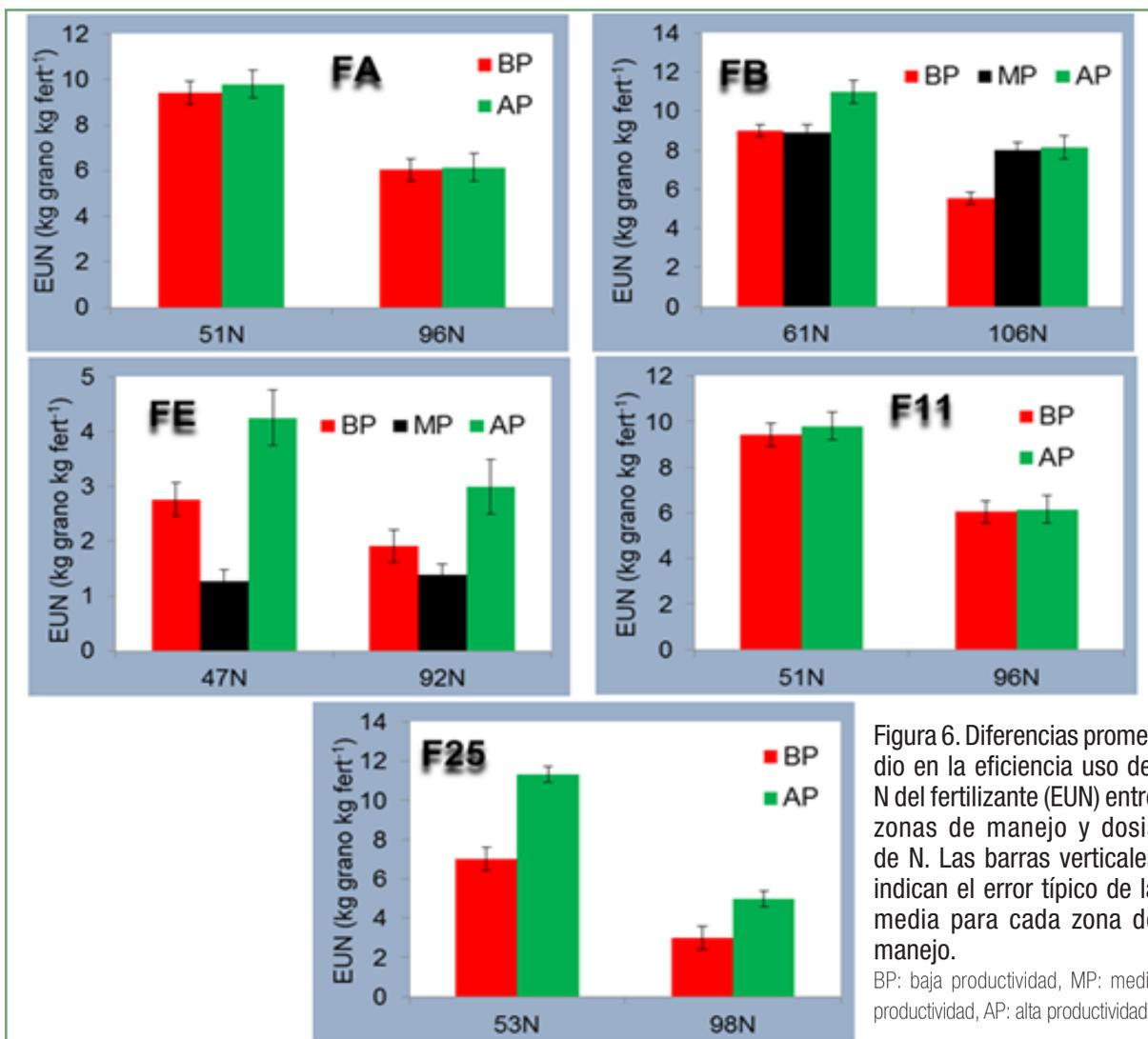


Figura 6. Diferencias promedio en la eficiencia uso del N del fertilizante (EUN) entre zonas de manejo y dosis de N. Las barras verticales indican el error típico de la media para cada zona de manejo.

BP: baja productividad, MP: media productividad, AP: alta productividad.

[volver al índice](#)

El cultivo de maíz fertilizado con nitrógeno incrementa el contenido de glomalina del suelo

María de los Ángeles Quinteros^{1,*}, Silvia Carrizo de Bellone², Carlos Bellone^{2,*}, Elena Boggiatto², y Germán Alderete¹

¹-INTA EEA Famailla, ²-UNT Facultad de Agronomía y Zootecnia

*Contacto: quinteros.maria@inta.gob; chbellone@yahoo.com.ar

INTRODUCCIÓN

La medición de la calidad y productividad del suelo son necesarios para definir la sustentabilidad de las prácticas agrícolas. La glomalina es una proteína que se utiliza como uno de los indicadores biológicos de calidad de suelo más eficientes, se encuentra en los hongos micorrízicos arbusculares (HMA). Estos hongos están relacionados con la nutrición de la planta, su sanidad y la estructura del suelo en el que se desarrollan los cultivos. Esto se debe a que los HMA se establecen en simbiosis en el sistema radical de las plantas, produciéndose un intercambio de nutrientes del suelo. Las plantas se benefician ya que incrementan su nivel nutricional debido a que las hifas tienen una capacidad exploratoria del suelo hasta 100 veces mayor que la de las raíces, mientras que los HMA reciben sustratos carbonados a cambio (Mosse y Phillips, 1971). Estos HMA producen glomalina, una glicoproteína que protege a las hifas durante el transporte de nutrientes desde la planta hasta el extremo de la hifa, y desde el suelo hasta la planta. Una vez que las hifas dejan de transportar nutrientes y senescen, la glomalina contenida en sus células se libera y se acumula en el suelo, representando el 5% del contenido de carbono (C) y nitrógeno (N) edáfico (Treseder y Turner, 2006). Esta glicoproteína una vez liberada actúa como un aglutinante de minerales y materia orgánica, por lo que está en directa relación con la estabilidad de agregados y la estructura del suelo. Es decir que la cuantificación de glomalina de un agroecosistema tiene varias implicancias, ya que su abundancia estaría reflejando buenas posibilidades nutricionales para la planta debido al incremento del volumen radicular, la mejor agregación del suelo e infiltración de agua, la mayor permeabilidad al aire, mejor actividad microbiana del suelo, entre otros procesos. El objetivo de este trabajo fue cuantificar el efecto de la fertilización nitrogenada sobre el contenido de glomalina del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para cuantificar el efecto de la fertilización nitrogenada del cultivo sobre el contenido de glomalina del suelo, se tomaron muestras de un ensayo de maíz variedad Leales 25 como monocultivo, en parcelas de 50 m² con una densidad de 50 000 plantas por ha, ubicado en Finca el Manantial de la Facultad de Agronomía y Zootecnia de la Universidad Nacional de Tucumán. En este ensayo se aplican tres dosis de nitrógeno bajo la forma química de urea, 50, 30 y 10 kg ha⁻¹ y un tratamiento testigo (sin adición de fertilizante), con 3 repeticiones siguiendo un diseño en bloques completos al azar. Cada parcela con una dosis determinada se mantuvo durante las campañas 2009/10 hasta 2013/14. Hacia el final del ciclo del cultivo de la campaña 2013/14, se tomaron muestras de suelo provenientes de los primeros 5 cm. De cada parcela se extrajeron seis muestras compuestas. Los muestreos se efectuaron durante la cosecha del cultivo. Las muestras de suelo fueron secadas y tamizadas, para determinar el contenido de C total (Black, 1965), N total por micro-Kjeldhal (Bremner, 1996), P extractable (Bray y Kurtz, 1945) y azufre (Fontanive et al., 2004). La cuantificación de glomalina fácilmente extractable se realizó según Wright y Upadhyaya (1996).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos encontrados, resumidos en la **Tabla 1**, presentaron una correlación positiva y significativa entre los valores de glomalina (**Figura 1**) y el contenido de C total ($r=0.52$), N total ($r=0.68$), P extractable ($r=0.58$) y S inorgánico ($r=0.45$) en el suelo. También se encontró una correlación positiva y significativa entre la abundancia de glomalina y el rendimiento del cultivo de maíz ($r=0.62$) mostrado en la **Figura 2**, registrándose el mayor rendimiento con el tratamiento con la mayor dosis de N.

Entre las poblaciones microbianas de la rizosfera están las micorrizas vesículo arbusculares cuyas funciones están en directa relación con el estado nutricional de la planta, siendo un indicador de su presencia, el contenido de glomalina del suelo. La

Tabla 1. Resultados acumulados durante 5 campañas de maíz de las variables analizadas en la campaña 2013/2014 en los cuatro tratamientos.

Tratamientos	Glomalina mg kg ⁻¹	M.O. (%)	Nt (mg kg ⁻¹)	P Bray-1 (mg kg ⁻¹)	S-SO ₄ ⁻² (mg kg ⁻¹)	Producción Ac. de Maíz (t ha ⁻¹)
Testigo	0.48	3.25	1.12	21	17	26.40
N10	0.62	3.28	1.14	23	16	31.90
N20	1.11	3.27	1.17	29	23	37.20
N50	2.24	3.30	1.21	33	28	45.75

producción de glomalina por el hongo, como así también el volumen radicular, la presencia de plantas hospedantes, y el balance de nutrientes en el tejido vegetal, influyen decididamente la respuesta del cultivo (Nichols y Wright, 2005). La glomalina producida por los hongos de micorrizas, puede ser alterada por características del suelo como la disponibilidad de nutrientes, que influirá sobre la actividad microbiana (Nichols y Wright, 2005).

Las plantas micorrizadas translocan C y N a sus HMA simbioses, pero cuando el crecimiento está restringido por la falta de nutrientes del suelo, el agregado de fertilizantes mejora la presencia y funcionalidad de las micorrizas (Treseder, 2004), es decir que una fertilización con N en maíz, muestra un mayor contenido de glomalina en el suelo. Estos resultados coinciden con la investigación de algunos autores que afirman que en suelos fertilizados la cantidad de glomalina suele ser alta ya que la descomposición de la hifas, con su consiguiente liberación, es más rápida que en suelos no fertilizados (Lovelock et al., 2004).

CONCLUSIONES

La cuantificación de glomalina del suelo es un biomarcador que permite valorar el efecto de prácticas agrícolas de fertilización. El cultivo de maíz fertilizado con diferentes dosis de N incre-

menta el contenido de glomalina, siendo esta superior con las dosis más altas.

BIBLIOGRAFÍA

- Black, C.A.** 1965. Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy, Inc., Publisher Madison, Wisconsin, pp. 770.
- Bremner, J.M.** 1996. Nitrogen-total. In: Methods of soil analysis, Part 3, Chemical methods. Sparks, DL (ed.). Soil Sci Soc America. Book series N° 5, pp. 1085-1128.
- Bray, R.H., y L.T. Kurtz.** 1945. Determination of total organic and available forms of Phosphorus in soils. Soil Science 59: 39-45.
- Fontanive, A., H. Jiménez., A. De la Horra., D. Efron, y L. Defrieri.** 2004. Determinación de azufre inorgánico en suelos. Método turbidimétrico. In: Sistemas de apoyo metodológico para Laboratorio de Análisis de suelo, agua, vegetales y enmiendas orgánicas. SAGPyA. ISBN 987-9184-40-8
- Lovelock, C.E., S.F. Wright, y K.A. Nichols.** 2004. Using glomalin as an indicator for arbuscular mycorrhizal hyphal growth: An example from a tropical rain forest soil. Soil Biol. Biochem. 36:1009-1012.
- Mosse, B., y J.M. Phillips.** 1971. The influence of phosphate and other nutrients on the development of vesicular-arbuscular mycorrhiza in culture. J. Gen. Microbiol. 1971: 157-166.
- Nichols, K.A., y S.F. Wright.** 2005. Comparison of glomalin and humic acid in eight native US soils. Soil Sci. 170: 985-997.
- Treseder, K.K., y K.M. Turner.** 2006. Glomalin in ecosystems. Soil Sci. Soc. Am. J. 71:1257-1266.
- Wright, S.F., y A. Upadhyaya.** 1996. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. Soil Science 161: 575-586.

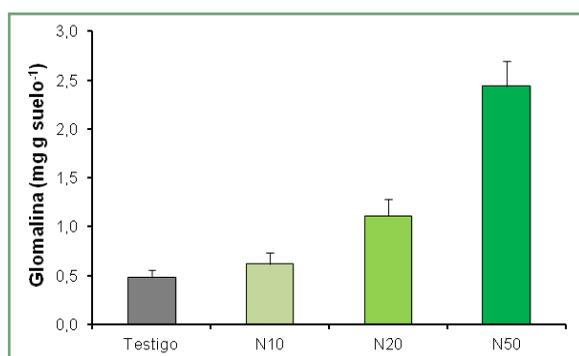


Figura 1. Análisis del contenido de glomalina del suelo en el cultivo de maíz para distintos tratamientos de fertilización nitrogenada. Las barras indican el desvío estándar.

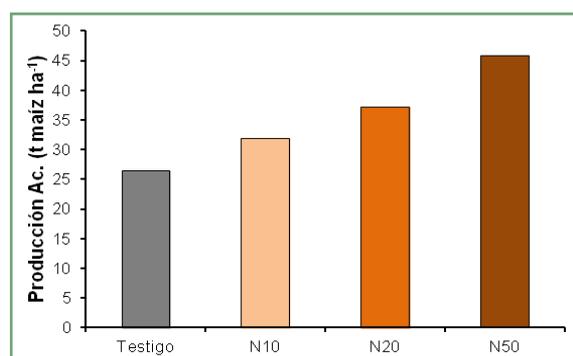


Figura 2. Producción acumulada de maíz para distintos tratamientos de fertilización nitrogenada. Campañas 2009/10 a 2013/14.

[volver al índice](#)

Análisis de ensayos en franjas para la fertilización variable de nitrógeno

H.M. Redel*, M.M. Zubillaga y M. Guerra

Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453 CABA.

*Contacto: hredel@agro.uba.ar

INTRODUCCIÓN

La variabilidad espacial de los rendimientos a escala intralote permite evaluar la conveniencia de la implementación de la fertilización variable. Actualmente se está modificando la tecnología convencional de aplicación uniforme de insumos dentro del lote de producción (Zubillaga y Urricariet, 2007). En este sentido, no solo se mejora la rentabilidad sino también se reduce el impacto ambiental (Ruffo et al., 2006; Muschietti Piana y Zubillaga, 2014).

La disponibilidad de nitrógeno (N) en la Región Pampeana es uno de los factores que con mayor frecuencia limita el rendimiento de maíz (Echeverría y Sainz Rozas, 2006; Álvarez, 2007). El diagnóstico de la fertilización nitrogenada generalmente se realiza en base al dato de disponibilidad inicial de nitrógeno (Alvarez et al., 2007). Y también introduciendo variables ligadas al potencial de mineralización (Reussi Calvo et al. 2014). Ambas fracciones de N presentan variabilidad espacial a escala intralote (Redel et al., 2014; Zubillaga et al., 2014). De este modo, se prevee que la dosis óptima de fertilización de N también puede variar espacialmente dentro del lote (Mamo et al., 2003). El N es uno de los nutrientes con importante respuesta sitio específica (Bongiovanni, 2002).

Las zonas de manejo (ZM) son subregiones dentro de los lotes que expresan una combinación homogénea de factores determinantes del rendimiento y para las cuales resulta apropiada una dosis única de N. Es decir, es importante identificar zonas dentro de un lote con diferente magnitud y probabilidad de respuesta en rendimiento a la aplicación de N para una mayor rentabilidad.

A nivel lote, la experimentación en franjas de N atravesando la variabilidad de ZM es una práctica habitual para analizar la respuesta de la fertilización N (Lawes y Bramley, 2012). Pocos estudios han considerado que los datos obtenidos con monitores de rendimiento no son independientes espacialmente, sino que las observaciones se correlacionan entre sí (Anselin et al., 2004). Es así

que para ensayos de fertilización nitrogenada en franjas es necesario utilizar modelos estadísticos que consideren la falta de independencia, siendo una opción los modelos lineales generalizados que contemplen estructura espacial de los residuos (Gotway y Stroup, 1997).

Los principios generales del manejo por ZM son transferibles entre regiones, pero debido a la variabilidad local de las condiciones climáticas y edáficas las estrategias deben ser calibradas localmente (Balboa et al., 2014). Es por esta razón que se deben llevar a cabo ensayos en cada establecimiento, ya que la interacción entre las ZM y la dosis de N será específica. Para poder generar esta información es necesario la diagramación de ensayos fáciles de organizar en el terreno y además que sean de rápido análisis.

El objetivo del presente trabajo es analizar las funciones de producción (rendimiento en función de dosis N) por ZM en distintos lotes de un establecimiento del partido de Lincoln (Provincia de Buenos Aires). De este modo se plantea, mediante una experimentación de fertilización N en franjas, una metodología de análisis simple la cual considera la falta de independencia de las observaciones obtenidas mediante los monitores de rendimiento. Asimismo la diferencia de rendimiento entre los lotes será evaluada en función de la disponibilidad de N inicial y del N potencialmente mineralizable.

MATERIALES Y METODOS

Descripción del sitio experimental

La experimentación se llevó a cabo en un establecimiento del partido de Lincoln, provincia de Buenos Aires. En esta región, Pampa Arenosa, se identifican ambientes de marcada heterogeneidad a escala intra-lote. La variabilidad encontrada en los suelos se corresponde con el paisaje, donde se encuentran Hapludoles énticos, franco grueso, en las partes más elevadas y convexas de las planicies y Hapludoles típicos, desarrollados entre las lomas (Dominio 19 del mapa de suelos de la provincia de Buenos Aires, INTA, 1989).

En la campaña 2013-14 se realizaron ensayos de fertilización nitrogenada sobre 3 lotes con cultivo de maíz (**Figura 1**). El ensayo se planteó en franjas con distintas dosis de fertilizante nitrogenado (0, 60, 120 y 160 kg N ha⁻¹), las cuales cruzaban todas las ZM. Estas fueron delimitadas con mapas de rendimiento de campañas anteriores e imágenes satelitales.

Los lotes presentaron diferencia de genotipo, fecha de siembra, densidad de plantas logradas y destino de la producción (**Tabla 1**). La fuente de N fue UAN (32-0-0), aplicado el 25/10/2013, en franjas de 0, 155, 308, y 410 litros UAN ha⁻¹. El momento de aplicación fue en 6 hojas completamente expandidas (V6, Ritchie y Hanway, 1982).

Determinaciones

Los rendimientos fueron registrados por monitores de rendimiento, los cuales se analizaron para extraer los valores atípicos y así realizar el análisis con los datos corregidos. El tamaño de cada pixel generado se correspondió al ancho de labor de la maquinaria y el tiempo transcurrido entre tomas sucesivas de observaciones generando pixeles de aproximadamente 26 m². Asimismo, se obtuvieron 40 muestras de suelo por lote, diagramadas en tránsectas, a una profundidad de 0-30 cm. Sobre

estas se determinaron los nitratos a la siembra por la técnica de diazotación con SNEDD (Marbán, 2005) y luego fueron secadas y tamizadas para la determinación del N potencialmente mineralizable, a través de incubaciones anaeróbicas cortas (Waring y Bremner, 1964). En esta determinación el N potencialmente mineralizable fue obtenido mediante la incubación de muestras de suelo en condiciones de anegamiento durante siete días a 40 °C. El N potencialmente mineralizable (Nan) se estimó como el N-NH₄⁺ producido durante la incubación.

Análisis estadístico

Con los mapas de rendimiento de los ensayos de fertilización nitrogenada se procedió a estimar los parámetros de la función de producción de maíz teniendo en cuenta la estructura espacial de los residuales (modelos lineales generalizados). Esta función fue dependiente de la dosis de N y la ZM como variable dummy. Los coeficientes del modelo de regresión fueron estimados mediante máxima verosimilitud haciendo uso del programa de estadística R (R. R Core Team, 2013). Sobre los datos de N inicial y N potencialmente mineralizable se realizó estadística descriptiva por lote productivo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los rendimientos obtenidos en los lotes productivos fueron contrastantes. El lote 1 presentó el mayor promedio de rendimiento (109 qq ha⁻¹), siendo el cincuenta por ciento de los pixeles mayor a los 100 quintales. El lote 3 (promedio 87 qq ha⁻¹) presentó la mayor variabilidad, con rendimientos muy bajos (10 qq) a rendimientos que superaron los 160 quintales. El lote 2 (promedio 79 qq ha⁻¹) presentó baja variabilidad y rendimientos intermedios, debido a que gran proporción de las plantas se encontraron volcadas, por lo que la cosechadora no pudo capturar las diferencias en rendimiento (**Figura 2**).

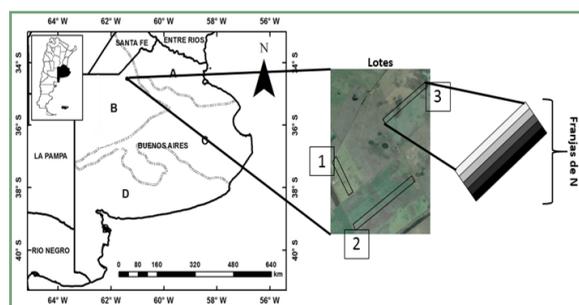


Figura 1. Localización del área experimental, especificación de los lotes y las franjas con dosis de N.

Tabla 1. Genotipo, densidad lograda de plantas, fecha de siembra (FS) y destino de producción para tres lotes productivos. Maíz. Campaña 2013/14. Lincoln, Buenos Aires.

	Lote		
	1	2	3
Genotipo	DEKALB 692 YR-RR	PANNAR 5E-203	PIONEER 1778 YRRR
Densidad lograda (pl ha ⁻¹)	74 490	77 900	78 320
FS	12/10/2013	16/10/2013	8/10/2013
Destino	GRANO	SILO	GRANO

La diferencia observada entre lotes puede deberse a la cantidad de N inicial y a distinto potencial de mineralización de N (Figura 3). El lote con mayor disponibilidad de N inicial fue el lote 2 con un promedio de 97 kg N-NO₃ ha⁻¹ con valores de 31 a 176 kg N-NO₃ ha⁻¹, siendo consistente el vuelco de plantas observado asociado a una adecuada disponibilidad de recursos y condiciones ambientales predisponentes (fuertes vientos y elevada humedad edáfica). La cantidad de N inicial para los lotes 1 y 3 fueron muy similares con un promedio de 70 y 76 kg N-NO₃ ha⁻¹ respectivamente con un rango de valores de 20 hasta 172 kg N-NO₃ ha⁻¹ y 32 a 144 kg N-NO₃ ha⁻¹ para el lote 1 y 3 respectivamente.

El lote que presentó mayor valor de Nan fue el 2 (promedio 46.3 mg kg⁻¹), siendo elevado también el potencial de rendimiento (no capturado por el monitor). En el lote 1 se dieron los menores valores de Nan (promedio 33.9 mg kg⁻¹), aun así se observaron los mayores rendimientos, por lo que el N no fue el factor más limitante en la producción. En el lote 3 (41.8 mg kg⁻¹) se encontró un valor intermedio de Nan, si bien este es mayor que el lote 1, su rendimiento fue significativamente menor, ya que en este se encontraron bajos inundados (las precipitaciones fueron superiores a lo normal). En este lote se perdió parte de la producción por anegamiento (el potencial de rendimiento se vio afectado por el exceso de agua).

Análisis de rendimientos por ambiente

Para estudiar la dependencia espacial de las observaciones se realizaron las funciones de producción con modelos tradicionales. Los residuos de estos se dispusieron en un gráfico de burbujas para evaluar visualmente su estructura espacial (Figura 4). En este tipo de gráficos el tamaño de las burbujas es proporcional al valor de los residuales, siendo las burbujas oscuras los residuos negativos y las claras los residuos positivos. Bajo independencia de observaciones es esperable que la dispersión de los valores sea heterogénea. En el lote 2 se observa una distribución aparentemente azarosa de los residuales, lo cual se puede verificar con la confección de semivariogramas. Por el contrario, los lotes 1 y 3 muestran un patrón en los residuales, donde se observan sectores de valores negativos y elevados de ellos y otros contrastantes, residuales elevados pero positivos. Esta dependencia se corroboró a través de la confección de semivariogramas.

Al observar dependencia de los residuales se prosiguió a ejecutar modelos que contemplen la misma. Se probaron varios modelos con distinta estructura de correlación de errores (Gaussiana, cuadráticos, lineales, esférica y exponencial) eligiéndose el mejor modelo a través del criterio AIC (Akaike, 1974). Asimismo, se realizó un análisis de varianza entre el modelo sin estructura y aquellos que contemplaban la misma. Los residuales del

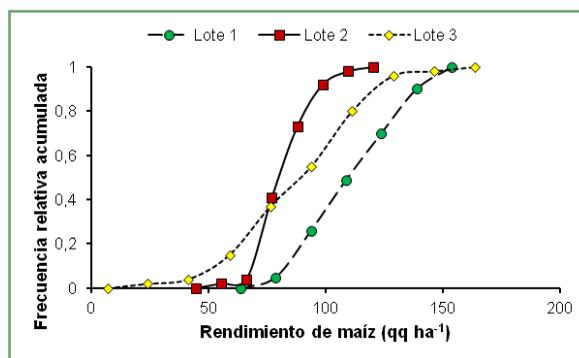


Figura 2. Frecuencia relativa acumulada del rendimiento en grano de maíz (qq ha⁻¹) para los distintos lotes productivos. Campaña 2013/14. Lincoln, Buenos Aires.

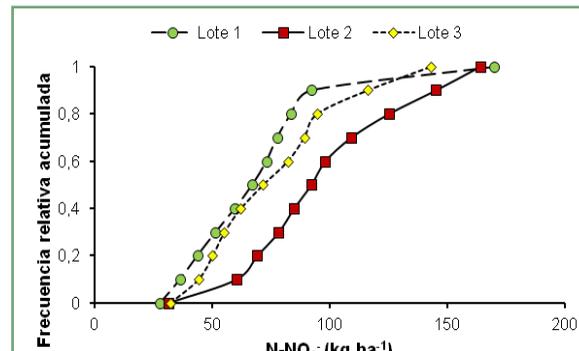
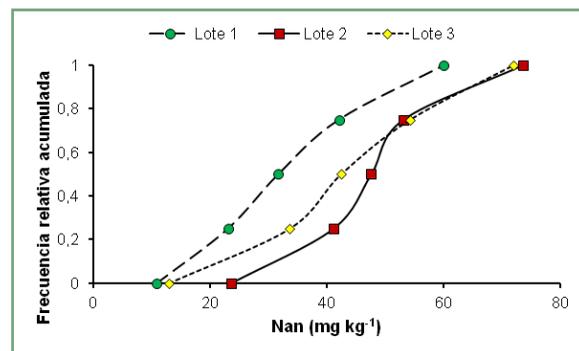


Figura 3. Frecuencia relativa acumulada del N incubado en anaerobiosis y N de nitrato para los distintos lotes productivos evaluados previo a la siembra de maíz. Campaña 2013/14. Lincoln, Buenos Aires.

modelo final elegido no presentan estructura, pudiendo analizarse los resultados obtenidos. Los 3 lotes analizados presentaron una mejora en el modelo al incluir la mencionada estructura, variando en cada caso los modelos de estructura y los parámetros de la misma (**Tabla 2**). El grado de dependencia varió para los distintos lotes, encontrándose para el lote 2 una menor dependencia, observada por un menor rango. Los lotes 1 y 3 presentaron dependencia similar.

Tabla 2. Análisis de estructura espacial de los residuales del modelo dentro de tres lotes productivos. Maíz. Campaña 2013/14. Lincoln, Buenos Aires.

Lote	Estructura espacial de errores	Rango (m)	Varianza nugget
1	Gaussian	49	0.57
2	Gaussian	9	0.53
3	Rational Quadratic	46	0.4

Las funciones de producción estimadas para cada lote y ZM se presentan en la **Tabla 3**. Los parámetros correspondientes a la zona de baja productividad se indican como Constante, N y N² siendo significativos al 1% en los lotes 1 y 3. Para el lote 2 únicamente la constante fue significativa. La significancia de los corrimientos de las mis-

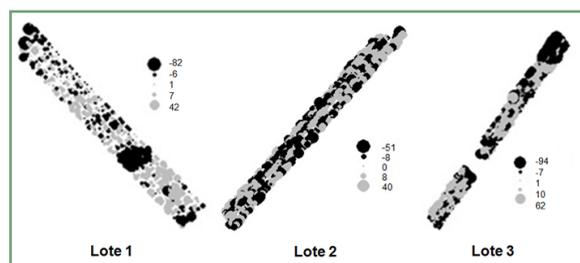


Figura 4. Residuales (qq de maíz ha⁻¹) del modelo sin estructura espacial dentro de tres lotes productivos. Maíz. Campaña 2013/14. Lincoln, Buenos Aires.

Tabla 3. Análisis estadístico de las funciones de producción de maíz según dosis de N y ambiente productivo. Campaña 2013/14. Lincoln, Buenos Aires.

	Lote 1		Lote 2		Lote 3	
	Parámetro	sig.	Parámetro	sig.	Parámetro	sig.
Constante	89.37	**	74.62	**	47.17	**
N	0.47	**	0.059	ns	0.56	**
N ²	-0.00136	**	-0.00061	ns	-0.00191	*
Zona AP	2.95	ns	7.71	**	9.03	*
Zona APxN	-0.303	**	-0.106	ns	0.016	ns
Zona APxN ²	0.00166	**	0.0009	ns	-0.00006	ns

Constante, N y N² son parámetros de la función de producción de la zona de baja productividad. Zona AP, Zona APxN y Zona APxN² son los corrimientos de los parámetros para la zona de alta productividad. SE, nivel de significancia, * y ** diferencias significativas al 5 y 1% de probabilidad. Ns, no significativo.

mas para la zona de alta productividad (Zona AP, Zona APxN y Zona APxN²) presenta variabilidad según el lote productivo estudiado. Los lotes 2 y 3 presentaron diferencias entre ambientes del valor constante, no encontrándose diferencias en el corrimiento debido a la dosis aplicada. El lote 1 no presentó diferencias en el valor de la constante, pero si para los corrimientos debido a la fertilización nitrogenada.

A partir de esta información se obtuvieron las funciones de producción (**Tabla 4**). El lote 1 presenta ambas zonas con altos rendimientos a dosis baja (10 y 15 quintales para los primeros 60 kg N ha⁻¹ para baja y alta productividad, respectivamente), sin observar grandes respuestas con el agregado de dosis crecientes de N. El lote 2 no registró respuesta a N, con rendimiento uniforme para todas las dosis de N. Las diferencias que se esperaban encontrar a priori no se observaron debido al estado del cultivo a cosecha, con una gran proporción de plantas volcadas. Por último, el lote 3 presentó la mayor respuesta a N, sin observar diferencias en la eficiencia agronómica del N entre ZM (pendientes iguales para ambas ZM).

Tabla 4. Funciones de producción de maíz (qq ha⁻¹) por zonas de manejo (ZM) dentro de tres lotes productivos. Campaña 2013/14. Lincoln, Buenos Aires.

Lote	ZM	Función de producción
1	AP	89.4 + 0.474 N - 0.00136 N ²
	BP	92.3 + 0.170 N - 0.00030 N ²
2	AP	82.3 - 0.047 N + 0.00029 N ²
	BP	74.6 + 0.0592 N - 0.00061 N ²
3	AP	56.2 + 0.577 N - 0.00197 N ²
	BP	47.2 + 0.561 N - 0.00191 N ²

AP, alta productividad. BP, baja productividad. N, dosis de nitrógeno (kg N ha⁻¹)

Las diferentes funciones de producción para las ZM permitirán aplicar dosis variable de N. En trabajos previos, para la misma región se establecieron funciones de producción por ZM para años secos y húmedos, encontrándose diferencia solo para años secos. En este sentido, se observó que la dosis óptima económica varió para las ZM de alta, media y baja productividad, con DOE de 154, 58 y 70 kg N ha⁻¹, respectivamente (Redel et al., 2014). Asimismo, estas diferencias se relacionaron a la capacidad de agua disponible (CAD) de los distintos tipos de suelo. Se obtuvieron valores de 121 mm de CAD para los Hapludoles típicos caracterizados por suelos profundos con mayor concentración de materia orgánica, mientras que para los Hapludoles énticos los valores de CAD medidos fueron de 80 mm, los que se han caracterizado por una baja capacidad de almacenamiento dado por un alto contenido de arena (Urricariet et al., 2011).

CONCLUSIONES

Los modelos lineales generalizados a partir de ensayos en franja con N permitieron mejorar el análisis de los rendimientos a escala intralote. Este análisis permitió incorporar la estructura espacial de los residuos al modelo. Las ZM han sido significativas para la mayoría de los lotes, obteniéndose funciones por ZM. Las diferencias en rendimiento entre ZM fueron del orden de los 7 a 9 quintales ha⁻¹.

Es importante contar con información específica de cada lote de producción, ya que la interacción entre las ZM y N son específicas para cada caso. Asimismo es deseable contar con información de varias campañas para obtener funciones consistentes. Por lo tanto, para el análisis de rendimientos a escala de lote debe considerarse este tipo de metodologías.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el proyecto 20020130100140BA UBACyT2014-2017, al convenio expediente CD 239966/12 FAUBA y al Ing. Agr. Tristán Villalobos del Establecimiento Tres Bonetes.

BIBLIOGRAFÍA

- Akaike, H.** 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control* 19 (6): 716-723, doi:10.1109/TAC.1974.1100705, MR 0423716
- Alvarez, R.** 2007. Fertilización de cultivos de granos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la región pampeana. Ed. Facultad de Agronomía UBA, 174 pp.
- Anselin, L., R. Bongiovanni, y J. Lowenberg-De Boer.** 2004. A spatial econometric approach to the economic of site-specific

nitrogen management in corn production. *American J. of Agric. Economics* 86: 675-687.

- Balboa, G., C. Cerliani, R. Balboa, y G. Esposito.** 2014. Evaluación de un modelo de dosificación de fertilización nitrogenada variable en maíz. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y II Reunión Nacional "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas". Bahía Blanca, 5 al 9 de mayo de 2014.
- Bongiovanni, R.** 2002. A spatial econometrics approach to the economics of site-specific nitrogen management in corn production. Tesis doctoral, Purdue University, West Lafayette, Estados Unidos. 280 pp.
- Echeverría, H.E., y H.R. Sainz Rozas.** 2006. En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds). Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina. 255-282.
- Gotway, C.A. y W.W. Stroup.** 1997. A generalized linear model approach to spatial data analysis and prediction. *J. Agric. Biol. Environ. Stat.* 2:157-178.
- INTA.** 1989. Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires, escala 1:500.000. 527pp, Bs. As. Argentina.
- Lawes, R.A., y R.G.V. Bramley. 2012. A simple method for the analysis of on-farm strip trials. *Agronomy Journal.* 104: 371-377.
- Mamo M, G Malzer, D J Mulla, D R Huggins, y J. Stroock.** 2003. Spatial and temporal variation in economically optimum nitrogen rate for corn. *Agron. J.* 95: 958-964.
- Marban, L.** 2005. Tecnologías en análisis de suelos. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Pág. 131-138.
- Muschietti Piana, M. y M.M. Zubillaga.** 2014. Agricultura de precisión y GEI: Efecto de la fertilización nitrogenada. En "Suelos, producción agropecuaria y cambio climático". 486-498.
- R Core Team.** 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <http://www.R-project.org/>
- Redel, H.M., A.A. Correndo y M.M. Zubillaga.** 2014. Manejo por ambientes de la fertilización con nitrógeno en maíz: análisis económico. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y II Reunión Nacional "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas". Bahía Blanca, 5 al 9 de mayo de 2014.
- Redel, H.M.; M.M. Zubillaga; M. Garat.** 2014. Variabilidad espacial de atributos del cultivo de maíz y disponibilidad de nitrógeno a escala intralote. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y II Reunión Nacional "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas". Bahía Blanca, 5 al 9 de mayo de 2014.
- Reussi Calvo, N., H.E. Echeverría, H.R. Sainz Rozas, A. Berardo, y N. Diovisalvi.** 2014. Contribución de la mineralización al diagnóstico de nitrógeno en los cultivos. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y II Reunión Nacional "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas". Bahía Blanca, 5 al 9 de mayo de 2014.
- Ritchie S.W., y J.J. Hanway.** 1982. How a corn plant develops. Iowa State Univ. Special Report 48. Weiss, M.; Baret, F.; Smith, G.J.; Jonckheered, I. and Coppin, P. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination, part II: Estimation of LAI, errors and sampling. *Agric. and For. Met.*, 121: 37-53.
- Ruffo M.L., G.A. Bollero, D.S. Bullock, y D.G. Bullock.** 2006. Site-specific production functions for variable rate corn nitrogen fertilization. *Prec. Agric.* 7:327-342.
- Urricariet, S., M. Niborski, y C.M. Kvolek.** 2011. Atributos de suelo y paisaje asociados a la variabilidad de rendimientos de maíz en la Pampa arenosa. *CI.Suelo* 29:49-59.
- Waring, S.A., y J.M. Bremner.** 1964. Ammonium production in soil under waterlogged condition as an index of nitrogen availability. *Nature* 201: 251-252.
- Zubillaga, M.M., y S. Urricariet.** 2007. Caracterización de la variabilidad en la fertilidad de los suelos según la tecnología de fertilización. En *Tecnología de la Fertilización de Cultivos Extensivos en la Región Pampeana*. Editorial de la Facultad de Agronomía UBA. Pág. 119-132. ISBN978-950-29-1012-3.
- Zubillaga, M.M., H.M. Redel, y F. Solari.** 2014. Mineralización de nitrógeno aparente en maíz a escala de lote. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y II Reunión Nacional "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas". Bahía Blanca, 5 al 9 de mayo de 2014.

[volver al índice](#)

¿El análisis de suelo permite diagnosticar la deficiencia de cinc en el cultivo de maíz?

Pablo A. Barbieri^{1,2}; Hernán R. Sainz Rozas^{1,2*}; Hernán E. Echeverría¹; Fernando Salvaggiotti¹; Pablo Barbagelata¹; Miriam Barra-co¹, Juan C. Colazo¹; Gustavo Ferraris¹; Héctor S. Sánchez¹, Raúl H. Cáceres Díaz¹; Nahuel I. Reussi Calvo³, Gabriel Esposito⁴, Mercedes Eyherabide¹ y Braian Larsen⁵

¹INTA, ²CONICET, ³Fertilab, ⁴UNRC, ⁵UNMdP

*Contacto: sainzrozas.hernan@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

La producción de granos en la región pampeana se ha incrementado sustancialmente durante los últimos años. A su vez, la intensificación de la actividad agrícola, la falta de rotaciones con pasturas y la mayor frecuencia del cultivo de soja han producido una notable disminución de los niveles de materia orgánica (MO) de los suelos de la región pampeana y extrapampeana (Sainz Rozas et al., 2011), los que en algunos casos, dependiendo del tipo de suelo y textura, presentan solo el 50% de su nivel original (Alvarez, 2001; Lavado, 2006). Además, esta caída en los niveles de MO se ha producido fundamentalmente a expensas de la disminución de las fracciones más lábiles, que son las que poseen mayor capacidad de liberar nutrientes (Brady y Weil, 1999). El agotamiento de dichas fracciones explicaría la respuesta generalizada al agregado de nitrógeno (N) (Echeverría y Sainz Rozas, 2005) y, en menor medida, a azufre (S) (Urricarriet y Lavado 1997; Reussi Calvo et al., 2008), pudiendo también generar condiciones de deficiencias de cinc (Zn) (Catlett et al., 2002). A su vez, el pH de los suelos y los niveles de fósforo (P) extractable (Bray y Kurtz, 1945; P-Bray) han disminuido por la actividad agrícola (Sainz Rozas et al., 2013). La disminución del pH y del P-Bray podrían generar aumentos en la disponibilidad de Zn para los cultivos (Wang y Harrell, 2005; Alloway, 2009).

La deficiencia de micronutrientes pueden limitar las funciones metabólicas de las plantas, más allá de ser requeridos en pequeñas cantidades para el crecimiento y desarrollo. Las deficiencias de Zn son menos frecuentes que las de N, fósforo (P) y S en los suelos de la región pampeana, ya sea por no manifestarse en forma aguda, o porque debido a la falta de investigación, no se las ha detectado e informado (Fontanetto et al., 2009). Sin embargo, la mayor exportación de Zn en grano, la escasa o nula aplicación del mismo y la mayor frecuencia de soja en las rotaciones,

podrían generar condiciones de deficiencia de este micronutriente. En un relevamiento de suelos de aptitud agrícola de la región pampeana realizado en la década del '80, se determinó que los contenidos de Zn se ubicaban por debajo de la media internacional y próximos a los umbrales de deficiencia, pudiendo ser limitantes para el cultivo de maíz (Sillanpaa, 1982). Más recientemente, se determinó que los niveles de Zn en suelos bajo agricultura han disminuido notablemente respecto de la situación prístina (70%), determinándose que el 50% de las muestras (n= 550) mostraron valores iguales o menores a 0.9 mg Zn kg⁻¹ (Sainz Rozas et al., 2013), valor considerado como crítico para la normal producción de los cultivos por la bibliografía internacional (Sims y Jhonson, 1991).

El desarrollo de métodos adecuados de diagnóstico para evaluar la disponibilidad de Zn es clave para un manejo racional del mismo. El extractante más utilizado es el DTPA (ácido dietilen triamino penta acético) propuesto por Lindsay y Norvell (1978). El mecanismo de acción de este extractante es a través de la formación de complejos con los cationes solubles del suelo, lo que provoca el desplazamiento de aquellos que se encuentran en los sitios de intercambio y formando complejos con la MO. Melgar et al. (2001), trabajando en el noreste de Buenos Aires y el sudeste de Santa Fe, informaron respuesta al agregado de Zn (5 de 14 sitios), aunque la misma no se asoció con el Zn extractable por Mehlich-3 (M3). Es válido destacar que se ha informado una elevada relación entre las cantidades extraídas por DTPA y M3, aunque esta última extrae entre dos y tres veces más Zn que el DTPA (Rodríguez et al., 2005). Esto sugeriría que además del Zn extractable podría ser necesario incluir en los modelos de diagnóstico otras variables de suelo relacionadas con la disponibilidad de Zn, tales como MO, pH y P extractable (Bray y Kurtz, 1945; P-Bray).

En Molisoles de la región pampeana, se determinó una baja relación ($r^2= 0.01-0.04$) entre el Zn-DTPA y variables de suelo como MO, pH y

P-Bray (Sainz Rozas et al., 2013), lo que indica la existencia de baja correlación entre las mismas. Por el contrario, Espósito et al. (2010), para Moli-soles del Sur de Córdoba, informaron una elevada asociación ($r^2 = 0.83$) entre Zn-DTPA y MO. Por lo tanto, es necesario contar con información proveniente de estudios de respuesta a la aplicación de Zn en los cuales se evalúe la relación entre estas variables y si su inclusión en un modelo múltiple (Zn-DTPA+MO+pH+P-Bray), permite un mejor diagnóstico de la disponibilidad de Zn que la utilización de una única variable (Zn-DTPA).

El objetivo de este trabajo fue determinar la respuesta del cultivo de maíz a la fertilización con Zn en la región pampeana y extrapampeana, y desarrollar un método de diagnóstico de la disponibilidad de Zn para el cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante las campañas 2009-2014 se realizaron 51 ensayos de fertilización con Zn en el cultivo de maíz en la región pampeana y extrapampeana (provincias de Buenos Aires, Santa Fe, Córdoba, Entre Ríos, San Luis y Chaco). En la **Tabla 1** se presenta los estadísticos descriptivos de las variables edáficas de los sitios experimentales. El diseño experimental fue en bloques completos aleatorizados (DCBA) con dos niveles de Zn (con y sin aplicación) y la fuente fue $ZnSO_4$. La fertilización con Zn fue aplicada al suelo, junto con la semilla o en forma foliar en estadíos de V2 o V6, siendo esta la aplicación más frecuente. La dosis al suelo fue de 3 a 4 kg Zn ha⁻¹, a la semilla de 0.1 a 0.15 kg Zn ha⁻¹, y la foliar de 0.4 a 0.7 kg Zn ha⁻¹. En todos los sitios antes de la siembra se realizó un muestreo de suelo (0-20 cm) en donde se determinó: pH, MO (Walkey y Black, 1934), P-Bray y contenido de Zn-DTPA, según la metodología propuesta por Lindsay y Norvell (1978).

Se aplicaron las mejores prácticas de manejo para cada región tanto en híbridos, densidad de plantas, espaciamento entre hileras y control de malezas e insectos. Todos los experimentos fueron fertilizados con N, P y S, de manera que estos no limiten el rendimiento.

Se determinó el rendimiento en grano ajustado al 14% de humedad. El rendimiento relativo (RR) del tratamiento sin Zn (Zn0) se calculó como el cociente entre el rendimiento en grano promedio del tratamiento Zn0 dividido por el rendimiento promedio del tratamiento fertilizado con Zn (+Zn) multiplicado por 100:

$$RR = [(Zn0 / +Zn) * 100].$$

El análisis de la varianza se realizó mediante el uso del programa PROC MIXED incluido en SAS 9.2 (SAS Inst., 2008). Los datos fueron analizados usando un diseño en parcelas divididas en donde la parcela principal fue el sitio experimental y la sub parcela los tratamientos de fertilización con Zn. Se trabajó con un nivel de probabilidad de 0.10. Se realizaron análisis de regresión entre el RR y las variables edáficas medidas utilizando las rutinas del programa SAS 9.2 (SAS Inst., 2008). La normalidad de los datos fue testeada usando el test de Shapiro y Wilk (1965) al 0.05. También se utilizó el método estadístico propuesto por Cate y Nelson (1971) para evaluar la relación entre el RR y el contenido de Zn-DTPA en presiembra.

RESULTADOS

Los suelos de los sitios en donde se llevaron a cabo los experimentos mostraron amplia variación en las propiedades edáficas, particularmente en el caso del P-Bray y del Zn-DTPA (**Tabla 1**). Todas las variables mostraron distribución no-normal, particularmente el P-Bray y el Zn-DTPA (**Tabla 1**), por lo que las mismas fueron transformadas por Log(10) antes de ser utilizadas como variables predictivas del RR.

El rendimiento en grano fue afectado por la interacción sitio x tratamiento de fertilización ($P \leq 0.01$), debido a la variación de la respuesta según combinación sitio-año (entre -725 y 2430 kg ha⁻¹). Se determinó respuesta significativa a la fertilización con Zn en 13 de los 51 sitios, lo que representa el 25% de los casos. El incremento promedio en los sitios con respuesta significativa fue de 1032 kg ha⁻¹, con un rango de 305 a 1990 kg ha⁻¹ (**Figura 1**). Estos sitios con respuesta mostraron valores de Zn-DTPA en suelo que oscilaron de 0.5 a 1.3 mg kg⁻¹.

Es importante destacar que la respuesta no fue afectada por el rendimiento de cada sitio (**Figura 1**), dado que la misma no se relacionó con el rendimiento máximo de cada sitio (+Zn; $P \geq 0.63$; $r^2 = 0.02$). Esto sugiere que, como para otros nutrientes de baja movilidad (por ej. P), la mejora en el rendimiento por incidencia de otros factores (por ej. agua) no produce mayor respuesta en condiciones de baja disponibilidad de Zn. Esto sería atribuido al incremento del crecimiento del sistema radicular y, por ende, de la capacidad de exploración del suelo por mejoras en las condiciones de crecimiento (Gutiérrez Boem y Steinbach, 2012).

Se determinaron asociaciones significativas ($p \leq 0.05$) entre la concentración de Zn-DTPA con la MO y el P-Bray, mientras que la misma no se relacionó con el pH del suelo (**Figura 2**). No obstante dichas asociaciones fueron bajas, por lo que estas variables podrían ser utilizadas en un modelo múltiple para predecir la respuesta a la aplicación de Zn. Sin embargo, cuando se relacionó el RR con las variables de suelo solo el Zn-DTPA y la MO contribuyeron significativamente, aunque ambas variables solo explicaron el 23% del RR (**Tabla 2**). Es válido destacar que aún cuando algunos sitios mostraron valores muy elevados de P-Bray, esta variable no influyó sobre el RR, aunque se ha informado que una elevada disponibilidad de P puede incrementar la respuesta a Zn en suelos con contenidos deficientes o cercanos a los umbrales críticos (Havlin et al., 2005) o incrementar la adsorción del mismo sobre óxidos e hidróxidos de Fe (Wang y Harrell, 2005). La escasa asociación entre el RR y el Zn-DTPA puede ser debida al efecto de otros factores edáficos (textura, temperatura, compactación, disponibilidad de agua, actividad biológica) sobre la movilidad y absorción de nutrientes poco móviles como el Zn. En este sentido, Astiz Imaz et al. (2014) informaron que la inoculación de plantas de maíz con micorrizas indígenas incrementó la asimilación de Zn respecto a plantas no inoculadas. Esto indica que para un mismo nivel de disponibilidad de Zn, la variación de

la actividad biológica puede causar diferencias en la absorción de Zn y, por lo tanto, en la magnitud de la respuesta al agregado del mismo. No obstante, la concentración de Zn-DTPA fue eficiente para separar sitios de probable respuesta de aquellos de respuesta improbable, ya que el 75% del total de sitios se ubicó en los cuadrantes positivos. El umbral para el logro del 97% de RR fue de 1 mg kg^{-1} (**Figura 3**). La concentración crítica determinada es cercana al rango de valores críticos (0.85 a 0.90 mg kg^{-1}) informado para el cultivo de maíz y soja (Lindsay y Norvell, 1978; Havlin y Soltanpour, 1981; Anthony et al., 2012).

Los resultados de este estudio constituyen un avance para el diagnóstico de la disponibilidad de Zn y el manejo de la fertilización, dado que hasta el momento no se disponía de información local que sintetice resultados que abarquen un amplio rango de condiciones edafoclimáticas. En particular, se validaron los umbrales de Zn en el suelo que generalmente se emplean en otras zonas productivas a nivel mundial.

CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo muestran que la disponibilidad de Zn podría limitar el rendimiento del cultivo de maíz. La concentración de Zn-DTPA en el suelo permitió separar adecuadamente sitios con y sin deficiencia de dicho nutriente.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos del pH, material orgánica (MO), fósforo extractable (P-Bray) y del Zn extractable con DTPA (Zn-DTPA) del horizonte superficial (0-20 cm de profundidad) de los sitios experimentales ($n=51$).

Estadísticos	Variables de suelo			
	pH	MO	P-Bray	Zn-DTPA
		%	mg kg^{-1}	
Promedio	6.06	3.22	25.6	1.52
Mediana	5.93	2.36	16.3	1.10
Valor mínimo	5.30	0.75	4.90	0.13
Valor máximo	7.90	7.35	193	7.07
Coefficiente de variación (%)	8.30	55.6	119	84.5

Tabla 2. Modelo de regresión múltiple para predecir el rendimiento relativo (RR) debido a la aplicación de Zn en suelos de la región pampeana y extrapampeana.

Variable dependiente	Variable	Valor del parámetro	p valor	r^2 parcial	r^2 total
RR (%)	Intercepto	69.2	0.001		0.23
	$\text{Log}(10) \text{ Zn-DTPA}^\dagger$	5.57	0.020	0.20	
	$\text{Log}(10) \text{ MO}^\ddagger$	5.64	0.080	0.03	

Variables seleccionadas de acuerdo al procedimiento stepwise al 0.10 de nivel de probabilidad.

† Zn extractable con DTPA (mg kg^{-1}).

‡ Materia orgánica (%).

AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por el proyecto INTA PNSUELO-1134024 y por el proyecto de la FCA-UNMdP 15/A464-AGR 464/14. Se agradece al laboratorio de suelos Fertilab por su colaboración en el análisis de las muestras.

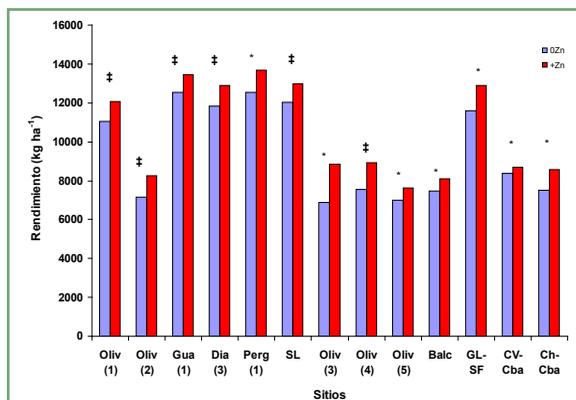


Figura 1. Rendimiento del tratamiento sin (Zn0) y con el agregado de Zn (+Zn) en los sitios con respuesta al agregado de Zn (13 de 51 sitios). Oliv= Oliveros (Santa Fe); Gua= Gualeguay (Entre Ríos); Dia= Diamante (Entre Ríos); Perg= Pergamino (Buenos Aires); SL= San Luis; Balc= Balcarce (Buenos Aires); GL-SF = Villa Cañas (General López, Santa Fe); CV-Cba= Cuatro Vientos (Córdoba); Ch-Cba= Chaján (Córdoba).

‡, *: Significativo al 0.10 y 0.05, respectivamente.

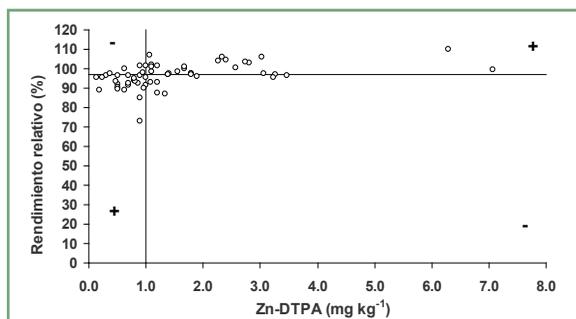


Figura 3. Relación entre el rendimiento relativo (RR) del tratamiento sin Zn (OZn) y la concentración de Zn-DTPA en el suelo (0-20 cm) en presiembra.

BIBLIOGRAFÍA

Alloway, B.J. 2009. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. *Environ. Geochem. Hlth.* 31:537-548.

Astiz Imaz, P., P.A. Barbieri, H.E. Echeverría, H.R. Sainz Rozas y F. Covacevich. 2014. Indigenous mycorrhizal fungi from Argentina increase Zn nutrition of maize modulated by Zn fertilization. *Soil Environ.* 33: 23-32.

Anthony, P., G. Malzer, S. Sparrow, y M. Zhang. 2012. Soybean yield and quality in relation to soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 104:1443-1458.

Alvarez, R. 2001. Estimation of carbon losses by cultivation from soils of the Argentine Pampa using the Century Model. *Soil Use and Man.* 17 (2): 62-66.

Brady, N.C. y R.R. Weil. 1999. The nature and properties of soil. 20th ed. Prentice-Hall, New Jersey, USA. 881 p.

Bray, R.H. y L. Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59:39-45.

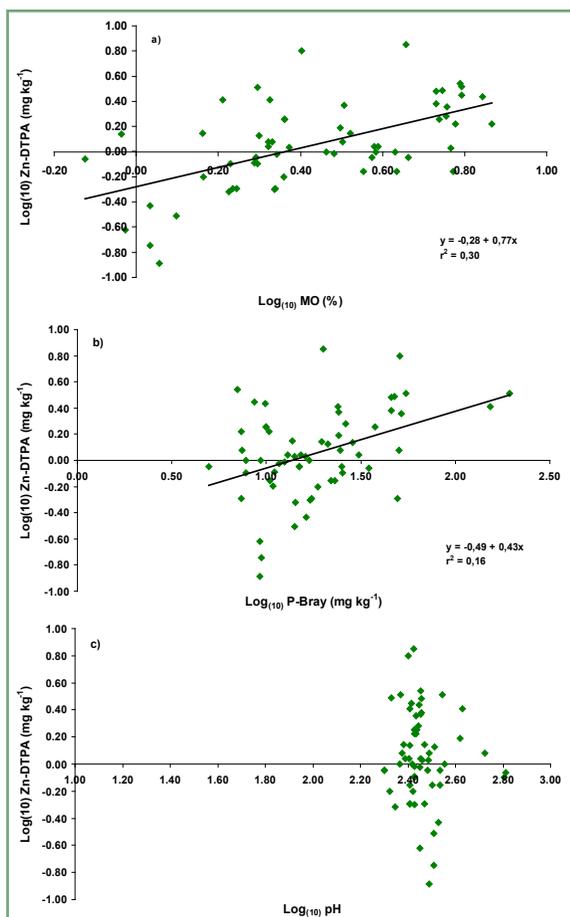


Figura 2. Relación entre el Zn-DTPA y la concentración de MO (a), P-Bray (b) y el pH (c) en presiembra (0-20 cm) en los 51 sitios.

- Catlett, K.M., D.M. Heil, W.L. Lindsay y M.H. Ebinger.** 2002. Soil chemical properties controlling Zinc +2 activity in 18 Colorado soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1182-1189.
- Echeverría, H.E. y H.R. Sainz Rosas.** 2005. Nitrógeno. En: HE. Echeverría y FO. García (eds). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina. Pp. 69-95.
- Espósito G. P., G. Balboa, C. A. Castillo y R. Balboa.** 2010. Disponibilidad de zinc y respuesta a la fertilización del maíz en el sur de Córdoba. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario. Santa Fe. Argentina.
- Fontanetto, H., O. Keller, J. Albrecht, D. Gialivera, C. Negro y L. Belotti.** 2009. Manejo de la fertilización de la soja en la región pampeana norte y en el NOA Argentino. *Mejores Prácticas de Manejo*. Simposio Fertilidad 2009 (Santa Fe, Rosario, may 13-14). pp 109-118.
- Gutiérrez Boem F.H y H.S. Steinbach.** 2012. Leyes de la fertilidad. En: Álvarez R., P. Prystupa, M.B. Rodríguez, C.R. Álvarez (eds.). *Fertilización de cultivos y pasturas: diagnóstico y recomendación en la región pampeana*. Editorial Facultad Agronomía, Buenos Aires, Argentina. Pp 656.
- Havlin, J.L., y P.N. Soltanpour.** 1981. Evaluation of the $\text{NH}_4\text{HCO}_3\text{-DTPA}$ soil test for iron and zinc. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:70-75.
- Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale, W.L. Nelson.** 2005. Basic Micronutrients. In: *Soil Fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management*. 7th ed. p. 244-297.
- Lavado, R.** 2006. La región Pampeana: Historia, características y uso de sus suelos. En: Álvarez R. (ed.) *Materia Orgánica "Valor Agronómico y Dinámica en Suelos Pampeanos"* Editorial Facultad de Agronomía, UBA. Buenos Aires, Argentina. pp. 1-11.
- Lindsay, W.L. y W.A. Norvell.** 1978. Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42:421-428.
- Melgar, R., M. Lavandera, M. Torres Duggan, y L. Ventimiglia.** 2001. Respuesta a la fertilización con boro y zinc en sistemas Intensivos de producción de maíz. *Ciencia del suelo* 19: 109-114.
- Reussi Calvo, N., H.E. Echeverría y H.R. Sainz Rozas.** 2008. Usefulness of Foliar Nitrogen-Sulfur Ratio in Spring Red Wheat. *Journal of Plant Nutrition*. 31: 1612-1623.
- Rodríguez, P., M. J. Lema, G. González y S. González Pimentel.** 2005. Evaluación del reactivo Mehlich 3 como extractante multielemental. [on line] <<http://www.efa-dip.org/comun/publicaciones/comunicaciones/2005/Mehlich.pdf>> [consulta: 25 de Febrero 2015].
- Sainz Rozas, H.R., H.E. Echeverría y H.P. Angelini.** 2011. Niveles de materia orgánica y de pH en suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana Argentina. *Ciencia del Suelo* 29:29-37.
- Sainz Rozas, H., M. Eyherabide, H.E. Echeverría, P. Barbieri, H. Angelini, G.E. Larrea, G. Ferraris, G y M. Barraco.** 2013. ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos? Actas del Simposio Fertilidad 2013. IPNI-FERTILIZAR. Rosario, 22 a 23 de Mayo de 2013.
- SAS Institute. 2008. *SAS/STAT user's guide*, Version 9.2. SAS Inst., Cary, NC.
- Sillanpaa, M.** 1982. Micronutrients and the nutrient status of soils: A global study. *FAO Soils Bulletin* 48. Pp.169-179.
- Sims, J.T. y G.V. Johnson.** 1991. Micronutrient soil tests. In *micronutrients in agriculture* (Book series 4): 427-476. Mortvedt, J.J., Cox F.R., Shuman L.M. y M.R. Welch (Eds.) Ed. SSSA Madison, Winsconsin, USA.
- Walkley, A. y I.A. Black. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.
- Wang, J.J. y D.L. Harrel.** 2005. Effect of ammonium, potassium, and sodium cations and phosphate, nitrate, and chloride anions on zinc sorption and lability in selected acid and calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:1036-1046. ■

[volver al índice](#)

La fertilización continua de largo plazo: Efectos sobre la estratificación del fósforo

Florencia A. Sucunza¹, Flavio H. Gutierrez Boem^{1,2}, Fernando O. García³, Miguel Boxler⁴ y Gerardo Rubio^{1,2*}

¹Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía- UBA – ²INBA CONICET, ³IPNI, ⁴Región CREA Sur de Santa Fe

*Contacto: rubio@agro.uba.ar

INTRODUCCIÓN

Los estudios locales sobre el fósforo (P) en el suelo, tales como los que determinaron umbrales críticos y los requerimientos de fertilización, se han concentrado generalmente en la capa superficial (típicamente los primeros 20 cm) (Ciampitti et al., 2009). No son abundantes los estudios en los horizontes subyacentes, a pesar que el P contenido en estas capas puede ser absorbido por los cultivos. Morrás (1999) evaluó el contenido de P total en el horizonte superficial (0-30 cm) y en el subsuelo (30-60 cm) en suelos pampeanos en base a datos que habían sido publicados en 1910 y 1922, es decir antes de la intensificación agrícola. En ese estudio se observó una distribución geográfica aproximadamente equivalente en las dos capas pero con un incremento en la acumulación del P en superficie al Este de la Región. Se estima que la distribución vertical del P del suelo es muy diferente a la situación original, debido al propio efecto de la remoción del elemento por los cultivos, su removilización desde horizontes superficiales y de otras prácticas de manejo como el sistema de labranza y la fertilización. Por ejemplo, se ha observado que los sistemas en siembra directa acentúan la estratificación del P en suelos pampeanos (García y Picone, 2004), aunque este fenómeno no es generalizado. Krüger (1996) no encontró diferencias en la redistribución del P según distintos métodos de labranza y concluyó en que la fertilización en banda habría contribuido a aumentar la natural variabilidad espacial del P en el suelo.

Los cambios en el P extractable del suelo están regulados por el nivel inicial de P y el balance de P (P aplicado– P removido por el cultivo) (Ciampitti et al., 2011 a; b). Los balances negativos conducen a descensos en el nivel de P extractable y los positivos a ascensos. Ciampitti et al. (2011 a, b) realizaron un relevamiento en los sitios de la Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe que permitió conocer los efectos de la fertilización de largo plazo sobre el balance de P y la dinámica de sus fracciones lábiles. De los resultados de

los primeros 6 años de la Red, se observa que los suelos con valores bajos o intermedios de P extractable (<20 mg kg⁻¹) presentan una rápida capacidad de respuesta a la fertilización fosfatada, incrementando los niveles de P extractable del suelo. Estos suelos presentan una baja o nula respuesta en la disminución de los valores ante situaciones de ausencia continua de aplicación de P (Ciampitti et al., 2011 a;b). Esta última situación lleva a que año tras año en esos suelos los niveles de P extractable en los análisis varíen moderadamente, por lo cual, no se toma conciencia de la pérdida de P del suelo. En suelos con valores elevados de P extractable (>45 mg kg⁻¹), la aplicación de P produjo respuestas erráticas en los niveles de P extractable, por lo cual, en muchas situaciones no se observan cambios en los valores de P extractable en suelo; mientras que situaciones con ausencia de aplicación de P llevan a una disminución rápida y continua de los niveles en suelo (Ciampitti et al., 2011 a). En el presente trabajo continuamos con esta línea de investigación aportando datos sobre los efectos de la fertilización de largo plazo (y la ausencia de ella) sobre la estratificación del P del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

En campos de la Región CREA Sur de Santa Fe se realiza un estudio de fertilización de largo plazo, que en la actualidad acumula 14 años manteniendo los mismos tratamientos. Los detalles de la red de ensayos figuran en García et al. (2010). Los ensayos siguen dos rotaciones alternativas: maíz – trigo/soja (doble cultivo) (M-T/Sj) y maíz – soja de primera y trigo/soja (M-Sj-T/Sj) (Tabla 1). En la campaña 2013/14, todos los sitios presentaron cultivo de soja, soja de primera en sitios con rotación M-Sj-T/Sj y soja de segunda en los sitios con rotación M-T/Sj. Los tratamientos de fertilización se efectúan en un diseño en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones en parcelas de 25-30 m de ancho y 65-70 m de largo. Los tratamientos se realizan anualmente siempre sobre las mismas parcelas. Las dosis

de fertilización fueron cambiando cada año en función de los requerimientos del nutriente por los cultivos según el rendimiento esperado. Las dosis de P se deciden anualmente estimándose a partir del rendimiento esperado del cultivo a fertilizar, aplicándose P en dosis equivalente a la reposición de la extracción en grano más un 5-10% en concepto de construcción de P en el suelo. La soja de primera no se fertiliza con N, mientras que la secuencia T/Sj se maneja fertilizando a la siembra del trigo con dosis para ambos cultivos. Las fuentes de nutrientes son urea (46-0-0), fosfato monoamónico (FMA; 11-23-0), y yeso agrícola (0-0-0-17S) para nitrógeno (N), P y azufre (S), respectivamente.

Para este análisis en particular, de un total de seis tratamientos (ver García et al., 2010) se evaluaron solo dos de los mismos: i) fertilizado con N y S, de aquí en adelante denominado -P; y ii) fertilizado con N, P y S, de aquí en adelante denominado +P. Previo a la siembra de los cultivos de soja de la campaña 2013/14, se tomaron muestras a 0-5, 5-10, 10-20 y 20-40 cm de profundidad, en cada parcela de los dos tratamientos de interés en los 5 establecimientos de la Red (**Tabla 1**). Se determinó el contenido de P extractable según Bray 1, y el P en el extracto se determinó colorimétricamente (Murphy y Riley, 1962). Para la el análisis de estratificación de P se realizó un ANOVA particionado por sitio, donde los factores tratamiento de fertilización, profundidad y su interacción fueron considerados como fijos, y bloque como aleatorio. Para el análisis comparativo del estrato superficial (0-20cm), se consideró el nivel inicial de P extractable de cada sitio como un tercer nivel del factor tratamiento de fertilización. Para este segundo análisis se realizó un ANOVA donde los factores sitio, tratamiento de fertilización y su interacción fueron considerados fijos, y bloque como aleatorio. En todos los casos se comprobaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. Los análisis estadísticos se realizaron mediante el paquete Infostat (Di Rienzo et al., 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la **Figura 1**, se presentan los resultados de la distribución vertical del P extractable para los sitios estudiados. El tratamiento - P no presentó diferencias significativas entre estratos, a excepción de los sitios Lambaré y San Alfredo. Lambaré presentó diferencias significativas en el primer estrato respecto de los tres restantes mientras que San Alfredo mostró diferencias entre varios estratos. Para el tratamiento + P, las diferencias significativas se presentaron entre los dos primeros estratos en todos los sitios, no observándose diferencias significativas en los dos últimos (10-20 y 20-40 cm). Promediando los 5 sitios con este tratamiento, el estrato 0-5 cm presentó aproximadamente el doble de P extractable que el estrato 5-10 cm, 5 veces más que en 10-20 cm, y 8 veces más que en 20-40 cm. Si focalizamos en los sitios con menor nivel de P extractable al comienzo del experimento (San Alfredo, Balducchi y La Blanca), la estratificación atribuible al agregado de P es más marcada, llegando a alcanzar diferencias entre la superficie y el estrato más profundo de hasta 13 veces para San Alfredo (P inicial 11.6 mg kg⁻¹), 11 veces para Balducchi (P inicial 10.8 mg kg⁻¹) y 8 veces para La Blanca (P inicial 16.2 mg kg⁻¹). Los sitios Lambaré (P inicial 67.7 mg kg⁻¹) y La Hansa (P inicial 44.8 mg kg⁻¹) muestran en su superficie 5 veces la concentración de P del estrato inferior. Estas diferencias en la estratificación entre tratamientos fertilizados y sin fertilizar coincidieron con lo hallado por Scheiner y Lavado (1998) en una zona vecina.

Las diferencias + P vs - P en los valores de P extractable para las mismas profundidades fueron significativas en los dos primeros estratos ($p < 0.01$) para todos los sitios. Lambaré, La Blanca y San Alfredo también presentaron diferencias significativas entre + P y - P para el tercer estrato (10-20 cm) ($p < 0.05$). Lambaré también presentó diferencias significativas en el último estrato (20-40 cm) ($p < 0.05$).

La **Figura 2** muestra el P extractable en 0-20 cm al comienzo del experimento (2000/01) compara-

Tabla 1. Información de ubicación de sitio, serie de suelo y rotación. Fuente: Red de Nutrición CREA (2001).

Provincia	Santa Fé	Santa Fé	Santa Fé	Santa Fé	Córdoba
Establecimiento	Balducchi	San Alfredo	La Hansa	Lambaré	La Blanca
Tipo de suelo	Hapludol típico	Argiudol típico	Argiudol ácuico	Argiudol típico	Hapludol típico
Serie de suelo	Santa Isabel	Hughes	Bustinza	Los Cardos	La Bélgica
Rotación	Maíz-Trigo/Soja		Maíz-Soja-Trigo/Soja		

do con los valores al año 2014 de los tratamientos - P y + P, para los 5 sitios bajo estudio. Dentro de cada sitio, es el tratamiento + P el que presentó mayor nivel de P extractable a excepción del sitio Lambaré, dónde el nivel de P inicial es el que presentó mayores valores, aunque sin diferenciarse del tratamiento + P luego de 14 campañas.

Si comparamos cada uno de los tratamientos en todos los sitios, se observa que para el P inicial Lambaré presentó el mayor nivel de P extractable, seguido por La Hansa, ambos significativamente mejor provistos de P que el resto de los sitios, (La Blanca, San Alfredo y Balducchi) entre los cuales no se observaron diferencias significativas. En la campaña 2013/14, Lambaré y La Hansa presentaron mayores niveles de P para el tratamiento + P, aunque La Blanca no se diferencia significativamente de éstos, ni tampoco de San Alfredo y Balducchi. Podríamos diferenciar dos grupos de sitios, aquellos con mayor nivel de P inicial, y los de menor P inicial, pero con aumentos comparativamente mayores respecto del P

inicial. Las diferencias de P extractable entre sitios disminuyeron con el tratamiento + P, tanto en términos relativos como absolutos. En términos absolutos la diferencia de P inicial (2000/01) entre grupos es de 56.9 mg kg⁻¹, y para el tratamiento + P (2013/14) es de 20.6 mg kg⁻¹. En términos relativos, las diferencias son de 6 y 1.5 veces respectivamente. Con respecto al tratamiento - P, no existen diferencias significativas entre sitios.

CONCLUSIONES

La fertilización fosforada de largo plazo acentuó la concentración de P extractable hacia los primeros 10 cm de los 5 suelos de la Región Pampeana analizados. El efecto de la fertilización fue disminuyendo hacia los estratos subsuperficiales. Sin embargo, en Lambaré la fertilización enriqueció el P extractable hasta el estrato 20-40 cm. Estos resultados sugieren la existencia de cierta movilidad del elemento desde el lugar de aplicación del fertilizante y que el valor para diagnóstico de

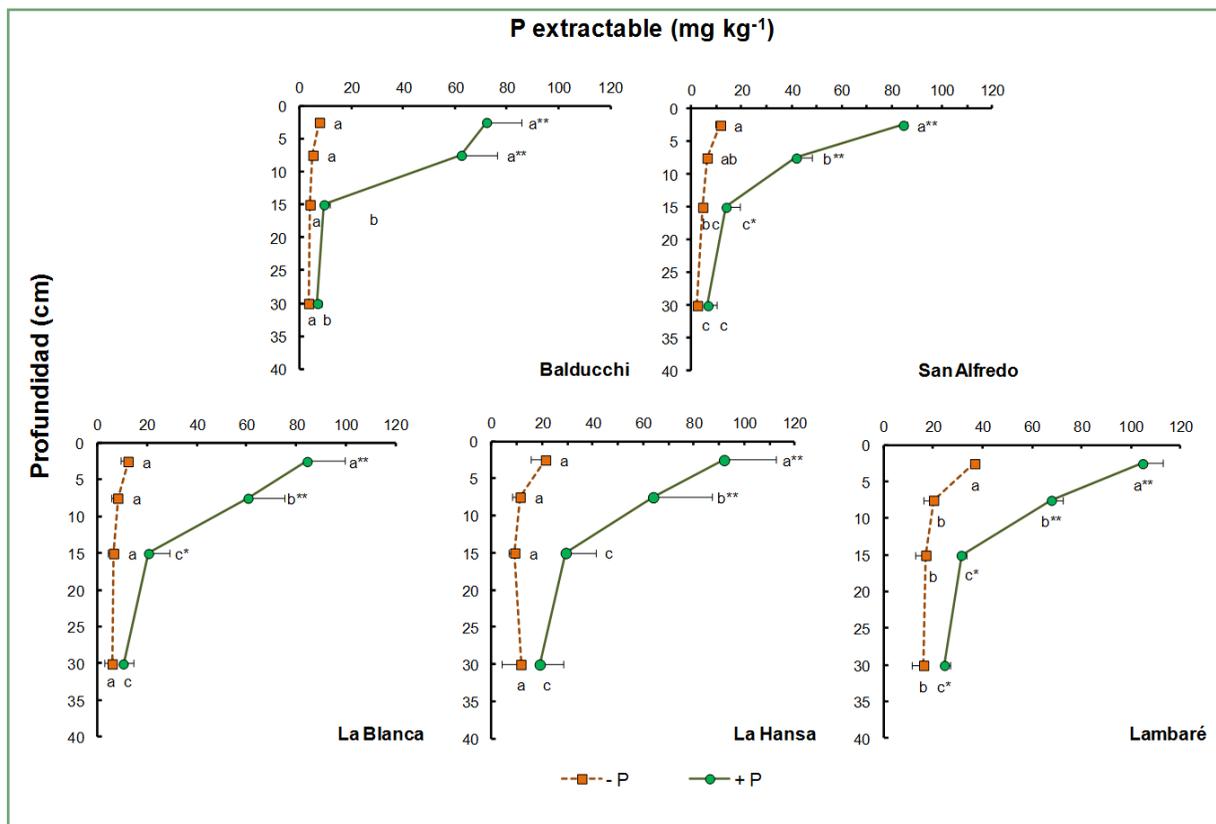


Figura 1. Distribución vertical de P extractable para los tratamientos - P y + P en los 5 sitios. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre profundidades para un mismo tratamiento (p<0.05). Los asteriscos (*) indican diferencias significativas entre tratamientos, para cada profundidad (* p<0.05, ** p<0.01). Las barras de error indican los desvíos estándar de las medias.

muestras tomadas a 0-20 cm puede variar en función de la historia de fertilización. Los sitios con menor P extractable inicial fueron los que presentaron mayores efectos de la fertilización y mayor estratificación de P extractable en términos relativos, llegando a alcanzar diferencias entre la superficie y el estrato más profundo de hasta 13 veces. El tratamiento + P, parece disminuir las diferencias entre sitios en nivel de P extractable.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece especialmente a Franco Permingeat por la colaboración en el muestreo a campo de los ensayos. La financiación del presente trabajo provino de UBA, CONICET y ANPCYT.

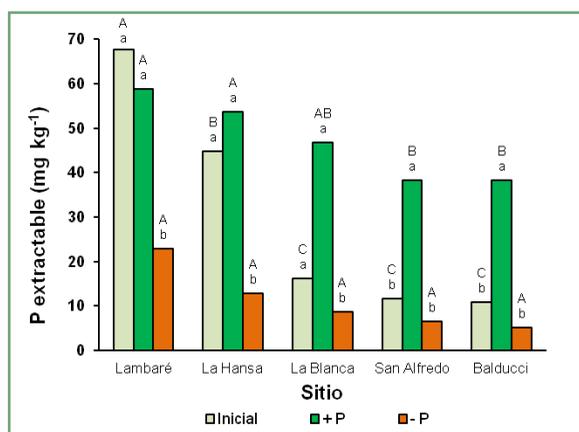


Figura 2. P extractable (0-20 cm) de tres situaciones: inicial (año 2000/1), - P (año 2014, sin recibir fertilización desde la situación inicial) y + P (año 2014, fertilizado con P desde la situación inicial) para los 5 sitios estudiados. Distintas letras minúsculas indican diferencias significativas entre tratamientos para cada sitio ($p < 0.05$). Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas entre sitios para cada tratamiento ($p < 0.05$).

BIBLIOGRAFÍA

- Ciampitti I.A., G. Rubio, L.I. Picone, y F.O. García.** 2009. El fósforo en la agricultura. Mejores prácticas de manejo. Mejores Prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos. Simposio Fertilidad 2009. IPNI Fertilizar.35-57 pp.
- Ciampitti, I.A., L.I. Picone, G. Rubio, y F.O. García.** 2011a. Pathways of phosphorous fraction dynamics in field crop rotations of the Pampas of Argentina. Soil Sci. Soc. Am. J, 75: 3: 918-926.
- Ciampitti I.A., L.I. Picone, F.O. García, y G. Rubio.** 2011b. Phosphorus budget and soil extractable dynamics in field crop rotations in Mollisols. Soil Sci. Soc. Am. J. 75: 131-142.
- Di Rienzo, J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, y C.W. Robledo.** 2013. InfoStat versión 2013. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- García, F., M. Boxler, J. Mintegiuga, R. Pozzi, L. Firpo, I. Ciampitti, A. Correndo, F. Bauschen, A. Berardo, y N. Reussi Calvo.** 2010. La red de nutrición de la región CREA sur de Santa Fe. Resultados y conclusiones de los primeros diez años 2000-2009. AACREA, Buenos Aires, 64p.
- García, F. O., y L. Picone.** 2004. Informaciones Agronómicas- nla.ipni.net.
- Krüger, H.R.** 1996. Sistemas de labranza y variación de propiedades químicas en un Haplustol Éntico. Ciencia del Suelo 14: 53-55.
- Morrás, H.J.M.** 1999. Geochemical differentiation of Quaternary sediments from the Pampean region based on soil phosphorus contents as detected in the early 20th century. Quaternary International 62:57-67.
- Scheiner, J.D, y R.S. Lavado.** 1998. The Role of Fertilization on Phosphorus Stratification in No-Till Soils. Comm Soil Sci, Plant Anal 29.: 2705-2711. ■

[volver al índice](#)

Impacto de la fertilización con K y Mn sobre la severidad de la podredumbre carbonosa (*Macrophomina phaseolina*) en plantas de soja[#]

Natalia Tobar Gómez^{1,2*}, Agustina Elesgaray¹, Federico Spagnoletti², Constanza Seijas¹, Raúl S. Lavado² y Marcelo Carmona¹

¹Cátedra de Fitopatología, Facultad de Agronomía-UBA, ²Instituto de Investigaciones en Biociencias Agrícolas y Ambientales (INBA)-CONICET/UBA

*Contacto: tobar@agro.uba.ar

[#]Este trabajo forma parte de la tesis de maestría denominada "Efecto de la Fertilización con Potasio y Manganeso sobre la pudrición carbonosa de la base del tallo causada por el hongo *Macrophomina phaseolina*" de la Escuela para Graduados Alberto Soriano (FAUBA-UBA). Director: Carmona, Marcelo. Codirector: Lavado, Raúl.

INTRODUCCIÓN

La producción y la calidad del grano de soja son afectadas por numerosos factores, como el manejo del suelo y el cultivo, condiciones ambientales desfavorables, agentes bióticos como malezas, plagas y enfermedades, destacándose en importancia estos últimos (Hartman et al., 1999). La soja es un hospedante importante del hongo *M. phaseolina* (Tassi) Goid, entre más de 500 especies afectadas. Este patógeno causa la pudrición carbonosa de la base del tallo (Carmona et al., 2009).

M. phaseolina, sobrevive en el suelo, en el rastrojo o en otros hospedantes y se transmite por semilla (Formento, 2011). La temperatura óptima para cumplir su ciclo, que dura entre 14 a 21 días, oscila entre 28 y 35°C. Los síntomas más severos los presenta cuando se presentan condiciones ambientales estresantes para el cultivo, suelos compactados, escasa cobertura y plantas con sistema radical deficiente (Pérez Brandan et al., 2009; Formento, 2011). Además, altas temperaturas y déficit hídrico estimula el desarrollo del hongo, haciéndolo dominante en regiones tropicales y subtropicales (Pérez Brandan et al., 2009; Carmona et al., 2009). La pudrición carbonosa de la base del tallo puede aparecer en cualquier estado fenológico del cultivo y su aparición produce elevados porcentajes de plantas muertas en los lotes (Pérez Brandan et al., 2009; Carmona et al., 2009). Los síntomas de dicha enfermedad varían según el momento del año en el cual la planta se infecta.

Frente a infecciones luego de la emergencia, los síntomas son lesiones de color pardo con manchas oscuras en cotiledones. Cuando la infección se produce desde la etapa de hoja unifoliada en adelante, los hipocótilos aparecen con manchas marrón oscuro a negro, pudiéndose

extender hasta el tallo, provocando la muerte de la plántula infectada si las condiciones ambientales predisponentes persisten (Pérez Brandan et al., 2009; Carmona et al., 2009). En plantas adultas, a comienzo de floración el hongo causa lesiones en las raíces, tallos, vainas y semillas. Produce obstrucción del sistema vascular por la producción de microesclerocios de color negro, debajo de la corteza y en la medula, provocando el marchitamiento y muerte de las plantas. En esta etapa es cuando se observan lesiones negras-grises en la base del tallo, generalmente con líneas oscuras en la médula (Pérez Brandan et al., 2009; Carmona et al., 2009). El cultivo infectado en el campo muestra amarillamiento prematuro en manchas. En condiciones graves de la enfermedad, el cultivo puede ser afectado en áreas grandes del campo (Gupta y Chauhan, 2005).

El hongo *M. phaseolina* merece atención, ya que la importancia de la enfermedad que causa está incrementándose sostenidamente, independientemente del manejo agrícola que se utilice (Carmona y Reis, 2012). En ciclos agrícolas recientes (2000/01, 2002/03, 2004/05 y 2011/12) se desencadenaron, epidemias severas de podredumbre carbonosa en el cultivo de soja, que causaron serias pérdidas en varias provincias de la Argentina y pérdidas totales en algunos lotes (Resnikov et al., 2013). La dificultad del control de esta enfermedad, constituye una amenaza a la sustentabilidad agrícola. No existen cultivos resistentes ni fungicidas que vayan a raíz.

Un aspecto poco estudiado, para controlar enfermedades de muy difícil control como ésta, es el manejo de la nutrición del cultivo, y como ésta puede afectar la epidemiología e intensidad de la enfermedad. La forma en que los nutrientes afectan el desarrollo de la enfermedad es a través de cambios en la fisiología de la planta, afectando directamente al patógeno, o a ambos. Cuando un

patógeno de suelo infecta la raíz, compromete su habilidad para tomar agua y nutrientes, por lo tanto afecta la translocación y la utilización eficiente de los nutrientes, causando deficiencias (Huber y Graham, 1999). Precisamente, cuando las plantas se encuentran bajo deficiencias, la fertilización reduce la severidad de la enfermedad y optimiza el crecimiento del cultivo (Dordas, 2008). Los nutrientes generan cambios fisiológicos y bioquímicos sobre la pared celular, la permeabilidad de la membrana y composición química del hospedante, pudiendo aumentar la concentración de compuestos fenólicos (Graham y Webb, 1991).

Uno de los nutrientes que más efectivamente afecta a las enfermedades de las plantas es el potasio (K). Este nutriente se encuentra en el suelo en forma inorgánica, y es altamente móvil dentro de la planta. Los fertilizantes más comunes son cloruro y sulfato de potasio (Daroub y Snyder, 2007; Prabhu et al., 2007). Entre sus funciones se destaca que aumenta el crecimiento de las raíces; mejora la absorción de agua y nutrientes; optimiza la función de las enzimas involucradas en el crecimiento; reduce la respiración; ayuda a la translocación de azúcares y de almidón; mantiene la turgencia celular; previene la degradación de clorofila e interviene en la reducción de la severidad de las enfermedades (Marschner, 1995; Prabhu et al., 2007). Perrenoud (1990) encontró que el K disminuye hasta en un 70% de los casos la incidencia de enfermedades fúngicas y que el rendimiento se ve favorecido en las plantas infectadas que se encontraban fertilizadas.

El efecto de la aplicación de este nutriente contra las enfermedades, es el aumento del grosor de las cutículas, primera barrera física para la infección. También reduce la acumulación de N y azúcares en los tejidos, que los hacen más predisponentes al ataque de patógenos y permite una rápida cicatrización de las heridas, acumulando alrededor de la misma compuestos tóxicos para los hongos (Spectrum Analytic, 2008). Por otro lado, plantas resistentes a enfermedades contienen más K que aquellas susceptibles (Prabhu et al., 2007). En plantas de soja, además, se asocia a la producción de fenoles y fitoalexinas, compuestos con propiedades antifúngicas (Couretot y Ferraris, 2007; Carmona y Sautua, 2011).

La relación de la fertilización potásica con la enfermedad producida por el hongo *M. phaseolina* fue estudiada en diferentes cultivos. Shaw en el año 1924 encontró que suelos con deficiencias de K favorecen el ataque de *Macrophomina*

corchori. Por otro lado, un cultivo de girasol fertilizado con nitrógeno (N), incrementó la susceptibilidad al hongo, mientras que altos niveles de fósforo (P) y K la disminuyeron (Zizzerini et al., 1985; Sivaprakasam et al., 1995). Por otra parte De y Chattopadhyay (1992), evidenciaron en dos variedades de jute (*Corchorus olitorius* y *Corchorus capsularis*) que incrementar los niveles de K en el suelo, redujo los daños causados por *M. phaseolina*. Algo similar ocurrió en plantas de lentejas (Sinha y Sinha, 2004). Por su parte, Indra y Grove (1998) encontraron, que el N y el P incrementaron la severidad de la pudrición carbonosa en *Phaseolus vulgaris*, mientras que la aplicación de K la redujo. Finalmente, en ensayos a campo sembrados con soja, se demostró que fertilizar con K y P incrementaron la resistencia a *M. phaseolina* (Csöndes et al., 2008).

Los micronutrientes también juegan un rol importante en la reducción de la severidad de enfermedades de las plantas. Este efecto es atribuido, tal como ocurre en los macronutrientes, a cambios fisiológicos y bioquímicos (Marschner, 1995). El manganeso (Mn) es probablemente el micronutriente más estudiado sobre el desarrollo de la resistencia a enfermedades foliares y de raíz (Graham y Webb, 1991). El Mn se encuentra en el suelo como Mn^{2+} disuelto en la solución, como Mn^{2+} intercambiable, Mn orgánicamente ligado y en sus formas oxidadas. La solubilidad es afectada por factores como pH, el potencial redox y los distintos tipos de complejos que forma. La planta lo adsorbe como Mn^{2+} (Marschner, 1995; Dechen y Nachtigall, 2006, Daroub y Snyder, 2007). El Mn cumple un rol preponderante en la síntesis de clorofila y se encuentra involucrado en la activación de enzimas (Dechen y Nachtigall, 2006). El rol de este elemento en la resistencia a las enfermedades, está relacionada con la ruta metabólica del ácido shikímico. El Mn interviene como cofactor para varias enzimas en la biosíntesis de metabolitos secundarios asociados a ella, como flavonoides, fitoalexinas y los precursores de la lignina (Römheld y Marschner, 1991; Graham, 1983; Krauss, 1999; Malavolta, 2006; Spectrum Analytic, 2006). También inhibe compuestos fitotóxicos solubles, y la actividad de enzimas como aminopeptidasas y pectinesterasas (Krauss, 1999). Si bien se ha reportado el efecto del Mn sobre la disminución de numerosas enfermedades provocadas por hongos y bacterias, no hay información suficiente, en ensayos in vivo, sobre cómo este micronutriente afecta específicamente

a la pudrición carbonosa de la base del tallo, en cultivos de soja.

Por su parte, la utilización de la fertilización como una medida de manejo sustentable para el control de enfermedades no se encuentra intensamente estudiada en nuestro país. Este trabajo es la primera aproximación al estudio del efecto de la fertilización con K y Mn, sobre la intensidad y severidad de una de las enfermedades más importantes de la soja, *M. phaseolina*.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se realizó en el invernáculo de la Cátedra de Fitopatología de la Facultad de Agronomía de la UBA. Se utilizó como hospedante plantas de soja de la variedad N 4990. Se trabajó con macetas de 1.5kg de capacidad, conteniendo un sustrato comercial a base de turba que se mezcló en proporciones 4:1 con arena previamente lavada y secada. De acuerdo con evaluaciones previas, se agregó un 10% de arroz inoculado con *M. phaseolina* según la técnica de Pastor-Corrales y Abawi (1988). Simultáneamente, se aplicó al suelo sulfato de potasio (K_2SO_4) y sulfato de manganeso ($MnSO_4$), en forma de riego. Las dosis utilizadas fueron equivalentes a 100 y 200 $kg\ ha^{-1}$ de K_2SO_4 y una única dosis de 600 $g\ ha^{-1}$ $MnSO_4$. Las macetas se incubaron durante 5 días y luego se sembraron las semillas esterilizadas superficialmente. Para ello se colocaron en etanol 70% durante un minuto, luego hipoclorito de sodio al 3% y finalmente tres lavados consecutivos con agua destilada estéril. El ensayo contó con 6 repeticiones y tuvo una duración de 70 días, alcanzando el estado fenológico de R4.

Como medida de la severidad de la enfermedad se determinó la intensidad del ataque del hongo medido como microsclerocios. Para ello se utilizó la técnica empleada por Mengistu et al. (2007) y Resnikov et al. (2013). Se tomaron las raíces, se lavaron y se secaron en estufa durante 7 días a 40°C, luego se molieron y tamizaron por malla de 1mm. Posteriormente se tomaron 0,005g de tejido molido, se esterilizó con hipoclorito de sodio al 3% y enjuagó con agua destilada estéril. Por otro lado se preparó Agar papa glucosado (PDA), autoclavado y enfriado, al que previamente se le agregó antibiótico Rifampicina (100mg l^{-1}) para evitar el crecimiento bacteriano y el fungicida metalaxil (224mg l^{-1}) para reducir las contaminaciones fungicas, luego se volcó 5ml del medio en una placa de Petri junto con las raíces molidas y desin-

fectadas. Cada placa se incubó en oscuridad por 3 días, contabilizando unidades formadoras de colonias (UFC $gr\ de\ raíz^{-1}$) como medida de severidad de la enfermedad y se calculó el porcentaje de control. El ensayo se realizó por sextuplicado. Se realizó un análisis de la varianza (ANOVA) para contrastar los tratamientos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los menores valores de UFC por gramo de raíz se obtuvo cuando se aplicó la dosis de 200kg de sulfato de potasio ha^{-1} (7124 UFC g^{-1}), la dosis de 100 kg de sulfato de potasio ha^{-1} combinada con 600g de sulfato de manganeso (7166 UFC g^{-1}) y la dosis de 100kg de sulfato de potasio ha^{-1} (7421UFC g^{-1}), esto indica una reducción de la enfermedad en comparación con el testigo sin tratar con fertilizante (12 368 UFC g^{-1}). Por otro lado aplicar al suelo 600gr de sulfato de manganeso ha^{-1} también presentó una reducción significativa del número de UFC g^{-1} .

Al mismo tiempo el tratamiento de 200kg de sulfato de potasio ha^{-1} con 600g de sulfato de manganeso ha^{-1} (10 843 UFC g^{-1}) no se diferenció del testigo (**Figuras 1 y 2**).

En concordancia con los datos obtenidos, los tratamientos con 200kg de sulfato de potasio ha^{-1} y 100 kg de sulfato de potasio ha^{-1} combinada con 600g de sulfato de manganeso obtuvieron los porcentajes de control más altos, controlando a la enfermedad en un 42%. Un valor similar obtuvo la dosis de 100kg de sulfato de potasio ha^{-1} . Finalmente, el tratamiento que presenta el menor control de la intensidad de la enfermedad producida por *M. phaseolina* es la aplicación de 200 kg de K ha^{-1} con 600gr de Mn ha^{-1} con un 12% (**Tabla 1**).

La metodología utilizada de medición de UFC por gramo de raíz es muy utilizada para evaluar intensidad de enfermedad y como ésta es afectada por diferentes tratamientos propuestos. Sin embargo, esta es la primera vez que se utiliza esta metodología para evaluar el efecto del K y Mn sobre la severidad de *M. phaseolina*. Si bien existen estudios donde evalúan el efecto de la fertilización con distintos nutrientes y distintas enfermedades, los trabajos relativos al efecto de la aplicación de K con respecto a la podredumbre carbonosa de la base del tallo en soja y otros cultivos son escasos mientras que la evaluación de la fertilización con Mn es inexistente. Ensayos en otras leguminosas demostraron reducción de

los daños ocurridos por *M. phaseolina* cuando se aplicó K (Indra y Grove, 1998; Sinha y Sinha, 2004) mientras que en soja la fertilización con K y fósforo incrementó la resistencia al patógeno (Csöndes et al., 2008).

Tabla 1. Porcentaje de control de la podredumbre carbonosa en cultivo de soja inoculado con *M. phaseolina* según tratamiento de fertilización en relación al testigo sin fertilizar. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Tratamiento	Porcentaje de control	Nro. de microesclerocios	
Testigo	0	12368	c
K200 + Mn	12	10843	bc
Mn	35	8067	ab
K100	40	7421	a
K100 + Mn	42	7166	a
K200	42	7125	a

CONCLUSIONES

La aplicación de dosis variables de K, combinadas o no con Mn, demostraron controlar en un 40% o más, a la enfermedad producida por el hongo *M. phaseolina*, medido como UFC g^{-1} de raíz. Sin embargo, el menor nivel de control ocurrió con la combinación de la dosis más alta de K con Mn. Esto determina la necesidad de ajustar las dosis ideales de estos nutrientes que reduzcan el efecto de la enfermedad.

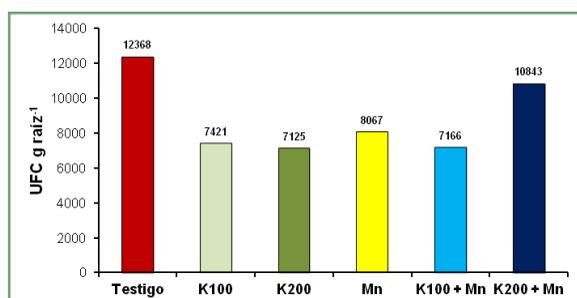


Figura 1. Unidades formadoras de colonia (UFC, g^{-1} de raíz) según tratamiento de fertilización en cultivo de soja inoculado con *M. phaseolina*.

BIBLIOGRAFÍA

Carmona, M., y E.M. Reis. 2012. Enfermedades en cultivos bajo siembra directa en Argentina y Brasil: pasado, presente y prospectivas de manejo. Revista Soja 2012, AAPRESID Pp.63-75.

Carmona, M., Gally, M., y F. Sautua. 2009. Identificación y Manejo de las Enfermedades. Manual del cultivo de soja en Fernando Oscar García; Ignacio Antonio Ciampitti; Héctor Baigorri. Pp. 99-127. Editores- 1a ed. - Buenos Aires: International Plant Nutrition Institute, 2009. 180 pag.

Carmona, M., y F. Sautua. 2011. Impacto de la nutrición y de fosfitos en el manejo de enfermedades en cultivos extensivos de la región pampeana. Actas Simposio Fertilizar 2011. Ed IPNI (International Plant Nutrition Institute) y Fertilizar, 18 y 19 de Mayo, Rosario, Argentina. Pp. 73- 82

Couret, L., y G. Ferraris. 2007. Nuevas estrategias de producción para alcanzar los rendimientos potenciales en soja. Uso de cloruro de potasio en combinación con fungicidas. Soja Campaña 2006-07. Available at: http://www.inta.gov.ar/pergamino/info/documentos/KCL_SojaO/.pdf

Csöndes, I., Balikó, K., y A. Dégenhardt. 2008. Effect of different nutrient levels on the resistance of soybean to *Macrophomina phaseolina* infection in field experiments. Acta Agronomica Hungarica. 53:357-362

Daroub, S.H., y G.H. Snyder. 2007. The chemistry of plant nutrients in soil. In Datnoff L, Elmer W. and Huber D. eds. Mineral nutrition and plant disease. The American Phytopathological society. Pp. 1-7

De, B.K., y S.B. Chattopadhyay. 1992. Effect of potash on stem rot disease of jute caused by *Macrophomina phaseolina*. J. Mycopath. Res., 30, 51-55.

Dechen, A.R., y G.R. Nachtigall. 2006. Micronutrientes. In: FERNADES, M.S. (Ed.) Nutrição mineral de plantas. Viçosa. Soc. Bras. Ci. Sol. Pp 328-352.

Dordas, C. 2008. Role of nutrients in controlling plant

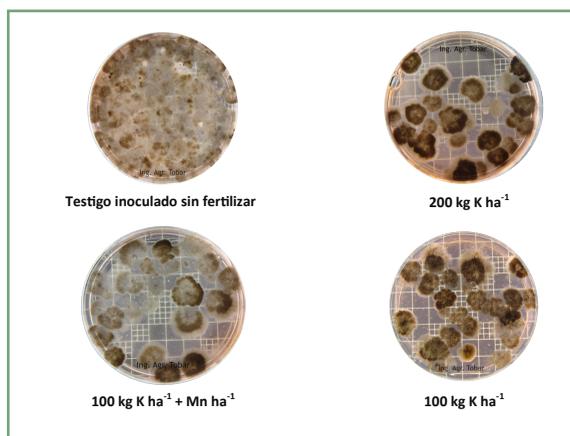


Figura 2. Placas de Petri con las UFC de *M. phaseolina* según tratamiento analizado.

diseases in sustainable agriculture. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 28:33-46

Formento, A.N. 2011. Podredumbre carbonosa (*Macrophomina phaseolina*). En *Las enfermedades de la soja y su importancia en los países del Mercosur*. Muñoz, R. y Sillon, M. (Eds). Pp.69-73

Graham, D.R. 1983. Effects of nutrients stress on susceptibility of plants to disease with particular reference to the trace elements. *Adv. Bot. Res.* 10:221-276

Graham, R.D. y M.J. Webb. 1991. Micronutrients and disease resistance and tolerance in plants. Pp.329-370. In J.J. Mortvedt, F.R. Cox, L.M. Shuman, and R.M. Welch eds. *Micronutrients in Agriculture*. 2nd edition. Soil Science Society of America.

Gupta, G.K., y G.S. Chauhan. 2005. Symptoms, identification and management of soybean diseases, technical bulletin, National Research Centre for Soybean (ICAR), Indore, India. 92

Hartman, G.L., Sinclair, J.B., y J.C. Rupe. 1999. Compendium of soybean diseases. 4th Ed. APS Press, The American Phytopathological Society, St. Paul MN, USA. Pp. 100.

Huber, D.M., y R.D. Graham. 1999. The role of nutrition in crop resistance and tolerance to disease, in: Rengel Z. (Ed.), *Mineral nutrition of crops fundamental mechanisms and implications*, Food Product Press, New York. Pp. 205-226.

Indra, H., y R.K. Grover. 1989. Influence of host nutrition on the efficiency of fungicides in controlling *Macrophomina phaseolina* on mung bean. *Plant Dis. Res.* 4: 170-173.

Krauss, A. 1999. Balanced Nutrition and Biotic Stress, IFA Agricultural Conference on Managing Plant Nutrition, 29 June-2 July 1999, Barcelona, Spain.

Malavolta, E. 2006. Manual de nutrição mineral de plantas. *Ceres*. 638 pag

Marschner, H. 1995. *Mineral nutrition of Higher Plants*. 2nd ed., Academic Press. Pp. 436-460.

Mengistu, A., Ray J.D., Smith, J.R., y R.L. Paris. 2007. Charcoal Rot Disease Assessment of Soybean Genotypes Using a Colony-Forming Unit Index. *Crop Science*, 47: 2453-2461

Pastor-Corrales, M.A., y G.S. Abawi. 1988. Reactions of selected bean accessions to infection by *Macrophomina phaseolina*. *Plant Disease*. 72:39-41.

Pérez Brandan, C., Díaz, C., Carmona, M., y G. March. 2009. Comportamiento de variedades de soja frente a infecciones naturales de la podredumbre carbonosa de la soja (*Macrophomina phaseolina*) en Salta (Argentina). *EEAA Marcos Juárez Ed: INTA*. Pp. 41-45.

Perrenoud, S. 1990. Potassium and plant health. 2.ed. Bern: Inter62. *Summa Phytopathol.*, 33: 56-62.

Prabhu, A., Fageria, N., Huber, D., y F. Rodríguez. 2007. Potassium and plant disease. In Datnoff L, Elmer W. and Huber D. (Eds). *Mineral nutrition and plant disease*. The American Phytopathological society

Resnikov, S., De Lisi, V., Gonzalez, V., Vellice, G., Castagnaro, A.P., y D.L. Ploper. 2013a. Estudios para

el control de la podredumbre carbonosa y enfermedades de fin de ciclo de la soja en el Norte argentino. *Jornadas Concurso BASF Top Ciencia*.

Römheld, V., y H. Marschner. 1991. Function of micronutrients in plants, in: Mortvedt J.J., Cox F.R., Shuman L.M., Welch R.M. (Eds.), *Micronutrients in Agriculture*. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA. Pp. 297-328

Sinha, R.K.P., y B.B.P. Sinha. 2004. Effect of potash botanicals and fungicides against wilt disease complex in lentil. *Ann. Plant Protect. Sci.* 12: 454-455.

Sivaprakasam, K., K. Pillayarswamy, y S. Rajaram. 1975. Effect of NPK on root rot disease incidence in sunflower. *Madras Agric. J.* 62: 308-309

Spectrum Analytic, Inc. 2006. The relationship between nutrients and other elements to plant diseases. Washington. Pp. 17

Zizzerini, A., M. Monotti, R. Buonauro, y V. Piran. 1985. Effects of some environmental and agronomic factors on charcoal rot of sunflower. *Helia*, 8:45-49

[volver al índice](#)

Biomasa y aprovechamiento de agua y nitrógeno de raigrás en un Haplustol éntico tratado con residuos de feed lot y zeolitas

Martín Torres Duggan^{1,2,*} y Mónica B. Rodríguez³

¹ Doctorando, FCV-UBA, ² Tecnoagro, ³ Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, FA-UBA.

*Contacto: torresduggan@tecnoagro.com.ar

INTRODUCCIÓN

La expansión de la agricultura que viene ocurriendo en los últimos años en la Argentina provocó el desplazamiento de los sistemas de producción de carne de base pastoril hacia el oeste de la Región Pampeana, donde prevalecen condiciones edáficas y agro-climáticas más restrictivas, marginales para la agricultura y limitantes en muchos casos de los propios modelos de producción forrajera (Lavado y Taboada, 2009; Lavado y Steinbach, 2010). Así, los nuevos planteos ganaderos se ubicaron principalmente en la denominada Pampa Arenosa y Región Semiárida Pampeana, donde los suelos se caracterizan por su elevado contenido de arena (~70-80%), y consiguientemente presentan baja capacidad de retención de agua y una elevada conductividad hidráulica. Asimismo, debido a las condiciones climáticas semiáridas y sub-húmedas imperantes en dichas regiones, los suelos presentan escaso desarrollo morfológico, bajos contenidos de MO y reducida capacidad de intercambio catiónico (CIC), y en algunas zonas existen también impedancias genéticas como la tosca, que reducen la profundidad efectiva del perfil y la capacidad productiva de los suelos.

Si bien los sistemas pastoriles continúan siendo los principales modelos de producción ganadera en la Argentina, en los últimos tiempos, se evidenció un marcado crecimiento de los sistemas de engorde intensivo a corral o feed lots (Moscuza, 2010; Wyngaard et al. 2012). Actualmente existen en la Argentina alrededor de 3000 establecimientos de feed lots, de los cuales el 85% se ubican en las provincias de Buenos Aires, Córdoba, Entre Ríos, y Santa Fe, el 5% en La Rioja, San Luis y La Pampa, y el resto se localizan en una gran diversidad de provincias. A diferencia de EE.UU, donde predominan los feed lot de gran escala, en la Argentina el negocio de feedlot configura un heterogéneo sistema en donde co-existen una gran diversidad de modelos ganaderos como explotaciones tradicionales que han incorporado corrales de engorde para realizar la fase final de

la invernada hasta feed lots comerciales de gran envergadura con instalaciones muy sofisticadas y empresas que prestan el servicio de hotelería (Ayarra, 2011).

Los modelos de engorde intensivo modificaron la funcionalidad de los ecosistemas tradicionales (i.e. ecosistemas pastoriles y/o sistemas integrados por cultivos anuales y pasturas plurianuales), los que para sostener la mayor productividad animal, reciben más insumos y generan más residuos y desechos que afectan el ambiente (Herrero y Gil, 2008; Viglizzo y Jobbago, 2010). Sin embargo, estos residuos presentan un interesante valor como fuente de nutrientes y mejorador de la fertilidad del suelo (Schwartz y Dao, 2005; Rodríguez et al. 2003). La aplicación de residuos orgánicos como fuente de N en recursos forrajeros representa una interesante tecnología teniendo en cuenta que este nutriente es el que genera mayor impacto sobre la productividad de gramíneas forrajeras (Ball et al., 2007; Torres Duggan y Lemos, 2009). Los mismos se pueden aplicar en la propia explotación generadora del residuo o bien en explotaciones vecinas (García, 2013). Sin embargo, a diferencia de lo que ocurre en otros países como los EE.UU, la utilización de este tipo de residuos orgánicos pecuarios no es aún una práctica frecuente ni difundida en la Argentina.

Debido a la gran expansión de los sistemas intensificados de engorde a corral y la consiguiente generación y acumulación de gran volumen de residuos, se considera que el manejo del estiércol será el principal problema que deberá enfrentar la producción agropecuaria de los próximos años. Esto es porque deben ser acondicionados para evitar problemas ambientales y sanitarios ya que en general estos residuos no se re-utilizan y pueden generar procesos de contaminación del suelo y del aire que requieren de estrategias de manejo para reducir el impacto ambiental de su disposición final (Bolton et al. 2004; Herrero y Gil, 2008; Basso y Herrero, 2008). El manejo eficiente del estiércol bovino es muy complejo ya que requiere del conocimiento de la concentración de nutrientes del

abono y del patrón de liberación de los mismos para satisfacer la demanda de los cultivos (Ball et al., 2007). Asimismo, la determinación de los momentos y formas de aplicación de los abonos, como así también la calibración de los equipos de aplicación son factores claves que deben ser ajustados localmente para generar modelos de fertilización y corrección de suelos. En la Argentina la investigación sobre utilización de estiércol es muy escasa y existen reclamos al sector científico para obtener respuestas a nuevos interrogantes que permitan el manejo sustentable de este tipo de residuos orgánicos (Bolton et al., 2004). Es por ello, que en los últimos años, se viene observando un creciente interés por la valorización agrícola de los estiércoles y residuos pecuarios (Rodríguez et al., 2005; Rodríguez y Torres Duggan, 2012).

Por otra parte, las tecnologías basadas en la utilización de agro-minerales, y en particular de la zeolita natural (Z), se consideran promisorias para mejorar la fertilidad de los suelos y la productividad vegetal. Las zeolitas son tectosilicatos (alúmino-silicatos hidratados) con una estructura cristalina abierta y tridimensional. Si bien en la Argentina se conocen referencias de hallazgos de zeolitas desde principios del siglo XX, el avance en el conocimiento tecnológico de sus aplicaciones, sumado a la creciente demanda del mercado, intensificaron en las últimas décadas los estudios en depósitos de zeolita en el país. Así, se han descrito diferentes yacimientos portadores de zeolitas en el centro y norte de la Argentina, principalmente en las provincias de Chubut, La Rioja y Mendoza. Sin embargo, las únicas manifestaciones de este mineral que han sido evaluadas desde el punto de vista de su potencial geológico-minero son las tobas zeolíticas ubicadas en la cuenca de Paganzo, en la provincia de La Rioja (Carrizo et al., 2006). Actualmente estos depósitos se encuentran en explotación y corresponden a la serie clinoptilolita-heulandita. Las propiedades más destacadas de las zeolitas son la estabilidad en la microporosidad (poros de tamaño nanométrico) y su elevada capacidad de intercambio y adsorción de cationes y agua en forma reversible (Ferreira y Schulthess, 2011). El intercambio de moléculas en la estructura cristalina de la clinoptilolita se logra a través de las esferas externas e internas, que a su vez están interconectadas por canales (Chester y Derouane, 2009). Estas propiedades determinan que la zeolita sea utilizada para una gran cantidad y diversidad de aplicaciones: construcción; tratamiento de efluentes; adsorción y

catálisis; nutrición animal; agricultura, entre las más importantes (Mumpton, 1999).

La formulación conjunta de Z con residuos orgánicos pecuarios constituyen enmiendas órgano zeolíticas (EOZ) que permiten aumentar la perdurabilidad de los efectos de las enmiendas orgánicas sobre el suelo (Mumpton, 1999). Esta propiedad puede ser aprovechada para mejorar la fertilidad de los suelos degradados o con pobre fertilidad natural, principalmente a través de aumentos en el aprovechamiento de recursos abióticos como agua o nutrientes, como así también para mitigar las pérdidas de N proveniente del abono orgánico (Hristov et al., 2011; Tarkalson y Ippolito, 2012). El objetivo del trabajo fue evaluar la influencia de la aplicación de residuos de feedlot y zeolitas naturales sobre la producción de biomasa y utilización de agua y N en raigrás perenne cultivado en un suelo Haplustol éntico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del ensayo, tratamientos y diseño experimental

Se realizó un experimento en invernáculo donde se cultivó raigrás perenne (*Lolium perenne L.*) en macetas plásticas. La densidad se siembra utilizada fue 4 g de semilla maceta⁻¹. Se utilizó un diseño en bloques completamente aleatorizado (DBCA), cuatro repeticiones (32 unidades experimentales) y arreglo factorial de tratamientos. Los factores evaluados fueron:

Factor Régimen de riego:

- Sin restricción hídrica: 90% CC
- Con restricción hídrica: 60% de CC

Factor Enmienda:

- Testigo (suelo natural) (S)
- Suelo + zeolita natural (SZ)
- Suelo + residuo de feed lot (SF)
- Suelo + zeolita natural +residuo de feed lot (SZF)

Las dosis de zeolita (Z) utilizada fue 5% (p/p). El residuo de feed lot (F) se aplicó utilizando una dosis equivalente a 20 t ha⁻¹ como base seca (15.3% de humedad). Tanto el F como la Z fueron aplicadas incorporadas, mezclando el material con la masa de suelo.

La necesidad de riego en cada tratamiento se evaluó por gravimetría, determinando la diferencia entre el peso de la maceta en el momento del riego y el correspondiente a la retención hídrica

de interés (90 o 60% CC) medidos al comienzo del experimento (Tsadilas y Argyropoulos, 2006).

Muestras y determinaciones en suelo y planta

El suelo utilizado en el experimento se obtuvo en un establecimiento ganadero del sur de la provincia de Córdoba. De acuerdo con un mapa básico de suelos realizado a escala de detalle (1:20.000), el suelo se localiza en la Pampa Arenosa y fue clasificado como Haplustol éntico, serie "Loma Medanosa" (Ongaro y Sanchez, 2007).

Las muestras de suelo fueron procesadas y analizadas en laboratorio utilizando metodologías de rutina (**Tabla 1**). Así, las mismas se homogeneizaron, secaron en estufa a 40°C y se tamizaron por 2 mm. Se determinó: pH (potenciometría), CE (conductimetría), COT (Walkley y Black), Nitrógeno total (Kjeldahl), fósforo extractable (Bray 1, cuantificación colorimétrica) según lo descrito en Sparks et al. (1996). Asimismo se cuantificó la concentración de nitratos en suelo por la técnica de diazotación con Snedd (Marban, 2005), amonio, CIC y cationes intercambiables (Richter et al., 1982). El fraccionamiento granulométrico (textura) se realizó según la metodología descrita en Ashworth et al. (2001).

Tabla 1. Principales características de fertilidad del suelo utilizado en el experimento.

Propiedades químicas y físico-químicas		
Analito	Unidad	Valor
pH	-	6.1
CE en extracto de saturación	dS m ⁻¹	1.0
COT	g kg ⁻¹	6.5
MO	g kg ⁻¹	11.2
Nt	g kg ⁻¹	0.72
Relación C/N		9.0
P extractable	mg kg ⁻¹	64.2
NO ₃ ⁻	mg kg ⁻¹	199
NH ₄ ⁺	mg kg ⁻¹	6.3
Ca intercambiable	cmolc kg ⁻¹	2.92
Mg intercambiable	cmolc kg ⁻¹	1.21
K intercambiable	cmolc kg ⁻¹	1.71
Na intercambiable	cmolc kg ⁻¹	0.05
PSI	%	0.9
CIC	cmolc kg ⁻¹	5.8
Fraccionamiento granulométrico		
Arena	%	87.0
Limo	%	5.5
Arcilla	%	7.5

En cuanto a la recolección de tejido vegetal se realizaron cortes periódicos de la biomasa aérea durante el transcurso del experimento. El tejido foliar fue secado en estufa a 60°C, hasta alcanzar peso constante. Se determinó el contenido de N total a través de una digestión húmeda (Bremner et al., 1982).

A partir de los datos de biomasa, agua consumida y concentración de N foliar se calculó la eficiencia de uso de agua (EUA; cociente entre la biomasa y el agua consumida), eficiencia fisiológica de uso de N (EUNf; cociente entre la biomasa y el N absorbido) según Caviglia et al. (2012) y la eficiencia de uso de N (EUN, cociente entre la biomasa y el N disponible). El N disponible se calculó sumando el contenido de N inicial en cada maceta y el N aplicado con el residuo de feed lot (N orgánico+inorgánico) (**Tabla 2**).

Tabla 2. Nitrógeno inicial en el suelo y aportado con el residuo de feed lot en los diferentes tratamientos evaluados.

Tratamiento	N inicial (mg maceta ⁻¹)	N aplicado (mg maceta ⁻¹)	N disponible (mg maceta ⁻¹)
T	49.5	0	49.5
SZ	47	0	47
SF	48	195	243
SZF	47	195	240

Caracterización del residuo de feedlot y las zeolitas utilizadas

Las muestras de residuo de feed lot fueron homogeneizadas y analizadas en laboratorio. Se determinó: pH (potenciometría); CE (conductimetría); C (Walkley y Black,); MO (calcificación a 450°C, previo secado a 105°C); N total; P (digestión húmeda con mezcla binaria de ácidos nítrico y perclórico y cuantificación colorimétrica); NH₄⁺ (extracción con solución de cloruro de potasio 0.1N); NO₃⁻ (extracción con solución de sulfato de cobre y ácido bórico) (**Tabla 3**).

Las muestras de Z utilizadas en el experimento se obtuvieron de tobas zeolíticas ubicadas en la cuenca de Paganzo en la provincia de La Rioja, descritas en Carrizo et al. (2006), pertenecientes a la serie clinoptilolita-heulandita. Se realizó la cuantificación de los constituyentes mayoritarios y trazas por métodos químicos por vía húmeda (SiO₂, CaO, CO₂), por espectrometría (CaO, MgO, Na₂O y K₂O) y por fluorescencia de rayos X (S, Zr, Zn, Ti, P, Pb, Cu) (**Tabla 4**).

Tabla 3. Caracterización química y físico-química del residuo de feed lot.

Analito	Unidad	Valor
pH	-	6.0
CE en extracto de saturación	dS m ⁻¹	3.4
Humedad	%	15.3
Materia seca	%	84.7
MO (base seca)	g kg ⁻¹	133.0
Relación C/N	-	8.4
NO ₃ ⁻	mg kg ⁻¹	298.0
NH ₄ ⁺	mg kg ⁻¹	61.7
N	g kg ⁻¹	64
P	g kg ⁻¹	5.8

Tabla 4. Composición química elemental de las muestras de zeolita.

Elemento	Composición principal (g 100g ⁻¹)
SiO ₂	70.94
Al ₂ O ₃	12.41
Fe ₂ O ₃	2.20
TiO ₂	0.22
P ₂ O ₅	0.02
MnO	0.02
CaO	2.39
MgO	0.67
K ₂ O	1.32
N ₂ O	1.9
SO ₃	<0.01
CIC (meq g ⁻¹)	1.49 (+/-0.01)
Pérdida por calcinación a 1000°C	7.84

Análisis estadístico

Los datos fueron analizados a través del Análisis de la Varianza (ANVA) factorial, determinando los efectos de cada factor y la interacción entre ellos. Los factores considerados fueron el tipo de enmienda o medio de cultivo (Suelo; Z, F o EOZ), el régimen de riego (90% y 60% de CC) y sus interacciones. Cuando las interacciones resultaron significativas, se presentaron las medias de todos los factores y sus niveles de tratamiento, ya que en esa situación no se pueden promediar medias de diferentes factores. Las comparaciones de medias se realizaron a través del test LSD Fisher ($\alpha=0.05$) utilizando el software Statistix (versión 9.0).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efectos de tratamientos

En términos generales, los tratamientos evaluados afectaron significativamente las variables estudiadas y en algunos casos se observaron interacciones entre factores (**Tabla 5**).

Producción de materia seca

Los tratamientos aplicados afectaron diferencialmente la producción de materia seca (MS) del raigrás según el régimen de riego considerado (i.e. interacción significativa entre el tipo de enmienda aplicada y el régimen de riego) (**Figura 1, Tabla 1**).

En los tratamientos sin restricción hídrica (90 % CC), la ausencia de respuesta al agregado de las enmiendas puede explicarse por la elevada disponibilidad de N inicial en el suelo (44 ppm de N-NO₃⁻), que sumado al aportado como enmienda orgánica (128 kg ha⁻¹ de N) habrían permitido cubrir la demanda del cultivo. En cambio, los tratamientos sometidos a restricción hídrica (60%

Tabla 5. Resultados del Análisis de la Varianza (valores p) indicando los efectos de los diferentes factores evaluados. EUA: eficiencia en el uso del agua. EUNf: Eficiencia fisiológica de uso de N. EUN: Eficiencia de uso del N disponible.

Factor	Biomasa (mg maceta ⁻¹)	Agua consumida (g maceta ⁻¹)	EUA (mg g ⁻¹ x100)	N absorbido (mg maceta ⁻¹)	EUNf (mg mg ⁻¹)	EUN (mg mg ⁻¹)
Enmienda (A)	0.0001	0.0043	0.0001	0.0007	0.0279	<0.0001
Régimen de riego (B)	0.0005	<0.0001	0.0510	<0.0001	<0.0001	0.0995
Interacción A x B	0.0535	0.1738	0.0610	0.0683	0.1665	0.5629

CC), mostraron incrementos de biomasa aérea del 28.2, 59.1 y 63.9 % en los tratamientos SZ, SF y SZF, respectivamente. La aplicación de Z (tratamiento SZ) incrementó significativamente la producción de MS en un 28.2% ($p < 0.05$), aunque la máxima acumulación de biomasa se alcanzó en los tratamientos donde se adicionó residuo de feed lot, independientemente de la presencia de Z. Estos resultados coinciden con lo descrito en la literatura internacional donde se indica que el aporte de MO a través de los residuos orgánicos pecuarios mejora considerablemente las propiedades edáficas (e.g. infiltración, conductividad hidráulica, actividad microbiana, etc.) y la productividad de los cultivos y forrajes (Imhoff et al. 2014; Pegoraro et al., 2014). Resultados similares a los obtenidos en este experimento fueron informados por Rodríguez y Gatti (2010) quienes evaluaron la aplicación de residuos de feed lot y zeolita en el cultivo de soja en un suelo Hapludol típico del oeste de Buenos Aires. En cambio, Gambaudo et al. (2014) observaron una baja respuesta en producción de MS en experimentos de campo conducidos en suelos Argiudoles típicos donde se agregaron diferentes dosis de efluente de tambo, inclusive en aquellos tratamientos donde se aplicaron dosis similares de N. Los autores atribuyeron la menor respuesta a las pérdidas de N durante la aplicación superficial del efluente, como así también a las escasas precipitaciones durante el ciclo del cultivo.

Es interesante destacar que la mejora de la producción MS asociada a la aplicación de Z (tratamiento SZ) en los tratamientos sometidos a restricción hídrica se verificó desde el comienzo del experimento (Figura 2). Estos resultados su-

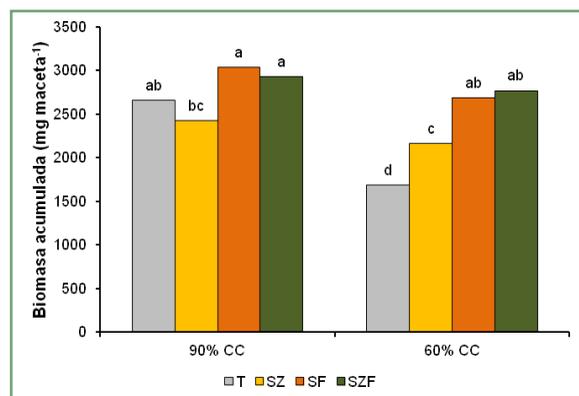


Figura 1. Biomasa (MS) acumulada de raigrás para los diferentes tratamientos. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($\alpha = 0.05$). Mínima diferencia significativa: 440.7 mg.

gieren que el mayor crecimiento de raigrás puede atribuirse a la conservación del agua promovida por la presencia de Z.

Consumo y eficiencia de uso de agua

El mayor consumo de agua se presentó en los tratamientos sin restricción hídrica (90% de CC), con una media de 4982 g de agua considerando todos los cortes realizados, mientras que en los tratamientos donde se restringió el riego (60% CC), la demanda de agua fue de 3831 g, sin observarse interacción significativa con el tipo de enmienda aplicada. Evidentemente, cuando las condiciones hídricas fueron favorables el raigrás presentó mayor crecimiento, hecho que se evidenció en la mayor biomasa acumulada en los tratamientos con mayor disponibilidad de agua (Figura 2).

En cuanto a los efectos de las enmiendas aplicadas, el mayor consumo hídrico se verificó en el tratamiento SF, independientemente del régimen de riego y diferenciándose significativamente ($p < 0.05$) de los demás tratamientos (Tabla 6).

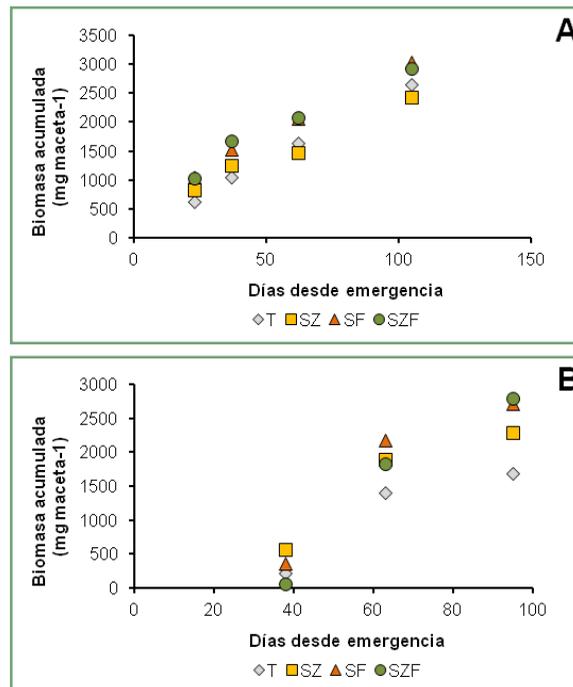


Figura 2. Evolución de la producción de MS acumulada del raigrás en los diferentes cortes en los tratamientos sin restricción hídrica (A; N=4) y con restricción hídrica (B; N=3).

Tabla 6. Consumo de agua del raigrás en los diferentes tratamientos. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas al 5%. Se indica entre paréntesis las letras derivadas de la comparación de medias por LSD al 10%.

Tratamiento	Consumo de agua (g)	Diferencia con el testigo (%)
T	4414 b (b)	
SZ	4196 b (c)	-5
SF	4689 a (a)	+6
SZF	4326 b (bc)	-2

Se observó una disminución significativa del consumo de agua del raigrás en los tratamientos donde se aplicó Z, ($p=0.10$). Estos resultados coinciden con los reportados por Rodríguez y Gatti (2010) quienes determinaron una respuesta del 30% en rendimiento de soja por agregado de 2.4 t ha⁻¹ de Z en un suelo Hapludol, asociando dicha mejora a una mayor oferta hídrica, derivada de una mayor conservación de agua. Además, a diferencia de nuestro estudio, los autores también observaron efectos aditivos de ambas enmiendas cuando la Z se combinó con 8 t ha⁻¹ de residuo de feed lot.

La reducción en el consumo hídrico por el agregado de Z, aunque a nivel de tendencia, resulta interesante ya que indicaría que es posible modificar la dinámica de utilización del agua en suelos ganaderos con baja capacidad de retención hídrica, como aquellos dominantes en ambientes áridos y semiáridos. En estas zonas, el agua es el principal factor limitante de la productividad forrajera y es donde justamente los suelos presentan muy baja capacidad de retención hídrica debido al elevado contenido de arena en su composición granulométrica. Sin embargo, es importante resaltar que la conservación de agua en suelos tratados con Z puede tener un efecto variable sobre la producción de biomasa, ya que este mineral puede actuar como fuente o destino de agua y N (Civeira y Rodríguez, 2011). Así, en el presente experimento, el tratamiento SZ presentó menor biomasa acumulada en relación a los demás tratamientos (T, SF, SZF) bajo el régimen de mayor disponibilidad hídrica (90% CC), que podría indicar cierta energía de retención del agua disponible en la microestructura porosa del mineral. Por el contrario, bajo restricción hídrica, el tratamiento SZ mejoró significativamente la producción de MS en relación a T, debido a la mayor conservación de agua.

En cuanto a la EUA, se observó interacción significativa ($p=0.061$) entre el régimen de riego y los tratamientos de aplicación de enmiendas. Así, con adecuada disponibilidad de agua (90% CC) no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos, mientras que bajo restricción hídrica, los tratamientos SF y SZF se diferenciaron significativamente del testigo pero no del tratamiento SZ (**Figura 3**).

La mayor EUA detectada en los tratamientos donde se agregó F (SF y SZF) no estaría vinculada con una mayor disponibilidad de N, ya que como se discutirá más adelante la absorción de N en los tratamientos donde se aplicó Z o F fueron similares (**Tabla 7**). Por consiguiente, el impacto de la aplicación de las enmiendas se debe a mejoras en la capacidad de retención de agua del suelo (tratamiento SZ) o bien a una mejora en la condición de fertilidad del mismo (tratamientos SF y SZF) generada por la enmienda orgánica. Estos resultados coinciden con otros estudios efectuados en diferentes cultivos y condiciones edáficas (Ramesh et al., 2011; Githinji et al., 2010; Hristov et al., 2011).

Absorción y eficiencia de uso de nitrógeno

El régimen de riego afectó significativamente la absorción y utilización de N por parte del raigrás (**Tabla 7**). La mayor absorción de N se produjo en los tratamientos sin limitaciones hídricas, asociado al mayor crecimiento (i.e. acumulación de biomasa). El patrón de respuesta del N absorbido fue similar al observado para la biomasa acumulada, detectándose una interacción significativa ($p=0.068$) entre los factores evaluados (régimen de riego x enmienda) (Tabla 7).

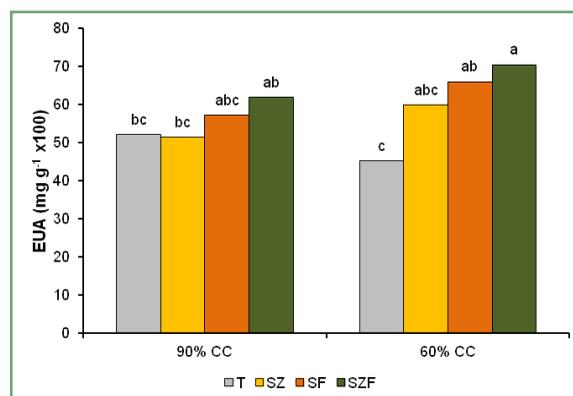


Figura 3. EUA en los diferentes tratamientos evaluados. Letras diferentes entre barras indican diferencias estadísticamente significativas al 5%.

Tabla 7. N absorbido, eficiencia fisiológica de uso de N (EUNf) y eficiencia de uso del N disponible (EUN) en los diferentes tratamientos. Letras diferentes entre tratamientos dentro de columnas indican diferencias significativas según el test LSD ($\alpha=0.05$).

Tratamiento	N absorbido	EUNf	EUN
90%CC			
T	75 bc	35 bc	54 a
SZ	76 bc	32 c	42 ab
SF	93 a	33 c	12 c
SZF	89 ab	33 c	16 c
60%CC			
T	36 e	49 a	39 b
SZ	60 d	36 bc	37 b
SF	57 d	47 a	11 c
SZF	65 cd	42 ab	13 c

En los tratamientos sin restricción hídrica (90% CC), la mayor respuesta en producción de biomasa y absorción de N se presentaron en los tratamientos donde se aplicó F. Bajo restricción hídrica, la absorción de N de los tratamientos SZ, SF y SZF fue significativamente mayor al testigo ($p<0.05$). En el tratamiento SZ, la mayor acumulación de N en la biomasa puede asociarse con la retención específica de NH_4^+ en la microestructura porosa de la Z, rasgo característico del mineral (Gowariker et al., 2009), ya que si bien la EUN en el tratamiento SZ fue mayor que en T, las diferencias no fueron estadísticamente significativas (**Figura 3**). El origen de este NH_4^+ sería la mineralización de la MO (amonificación) ocurrida durante el período del estudio, ya que la concentración de este catión en el suelo al inicio del experimento fue muy baja.

El régimen de riego no afectó la EUNf (i.e. biomasa generada por cada unidad de N absorbido). Las diferencias en EUNf entre tratamientos surgen de los impactos diferenciales de los mismos sobre la acumulación de biomasa (numerador de la EUNf) y absorción de N (denominador de la EUNf). La mayor EUNf se alcanzó en los tratamientos T, SF y SZF, mientras que en el tratamiento SZ la mayor absorción de N no implicó un efecto proporcional en la acumulación de biomasa. Asimismo, en el tratamiento T, si bien la EUNf fue elevada y similar a SF y SZF, la productividad fue muy baja y significativamente menor (**Figura 1**). Por consiguiente, estos resultados indican que la utilización de EOX permitió maximizar la productividad forrajera, sosteniendo elevadas EUNf, consecuencia del mejoramiento en la retención de humedad del suelo.

A pesar de la mayor absorción de N del tratamiento SZ, la EUN fue similar a la observada en el T, aunque significativamente mayor que en SF y SZF. Esto difiere con lo reportado por Aghaalkhani et al. (2011) quienes observaron mayor EUN en el cultivo de colza en los tratamientos con agregado de zeolita (9 t ha^{-1}), independientemente de la dosis aplicada. Sin embargo los autores vincularon los aumentos en la EUN principalmente a la reducción de las pérdidas por lixiviación de NO_3^- , proceso que no ocurrió en el presente experimento teniendo en cuenta que la disponibilidad de agua en los diferentes regímenes de riego se mantuvo por debajo del límite máximo de retención de agua del suelo (CC) y por consiguiente, no ocurrió percolación. Asimismo, la incorporación del F al suelo durante la formulación de los tratamientos en las macetas habrían minimizado las pérdidas por volatilización de NH_3 , que son especialmente elevadas cuando el estiércol se aplica sobre la superficie (Bolton et al., 2004; Wyngaard et al., 2012).

La mayor absorción de N en los tratamientos SF y SZF no implicó un aumento equivalente o proporcional en la EUN. Por el contrario, la EUN fue significativamente más baja que en T y SZ, indicando un exceso de oferta de N relativo a la demanda del cultivo. En este sentido, la aplicación de zeolita (tratamiento SZ) permitió optimizar el N disponible en el sistema suelo-planta, ya que aumentó significativamente la biomasa forrajera en relación al testigo y absorbió más N sin generar reducciones en la EUN. Los tratamientos SF y SZF (que incluyeron el agregado de F), si bien permitieron maximizar la productividad forrajera, presentaron una baja EUN, indicando una elevada oferta de N en estos tratamientos. Posiblemente el óptimo en términos de acumulación de biomasa y EUN se alcance en condiciones intermedias de disponibilidad de N, no exploradas en este estudio.

Los resultados obtenidos en este experimento sugieren que tanto las enmiendas orgánicas aplicadas solas o como EOX constituyen alternativas tecnológicas potencialmente atractivas para mejorar la fertilidad de los suelos, la producción forrajera en áreas marginales a través del incremento en el aprovechamiento de agua y N.

CONCLUSIONES

En términos generales, se detectaron efectos significativos ($p<0.05$) del tipo de enmienda y régimen de riego sobre la biomasa de raigrás,

EUA y EUN, observándose en algunos casos interacciones entre los factores.

Sin restricción hídrica, no se detectaron efectos significativos del agregado de las diferentes enmiendas o de la EOZ sobre la biomasa de raigrás debido a la elevada disponibilidad de N inicial del suelo que, junto a una adecuada provisión de agua, permitieron maximizar la producción de MS. Sin embargo, la EUN se diferenció mostrando valores significativamente inferiores para los tratamientos SF y SFZ evidenciando que el aporte de N del feed lot fue muy superior a la oferta del suelo y el requerimiento del raigrás. Tampoco se detectaron diferencias entre tratamientos en cuanto a la EUA.

En cambio, bajo restricción hídrica (60% CC), todos los tratamientos superaron significativamente al testigo en la producción de biomasa. Se observó un aumento de 28.2, 59.1 y 63.9 % en la producción de MS, en los tratamientos SZ, SF y SZF, respectivamente. En todos los casos dichos incrementos fueron explicados por el incremento del N absorbido. En el tratamiento Z, aunque no hubo aporte de N, aumentó significativamente la producción de MS desde el comienzo del experimento, ya que la EUA promovida por la zeolita permitió un mejor aprovechamiento del N disponible ($p=0.10$) respecto del testigo. Para los tratamientos con F (SF y SZF) las tendencias fueron similares aunque los incrementos en MS fueron muy superiores en virtud del elevado aporte de N proveniente del F.

Los resultados obtenidos en el presente estudio, aunque preliminares, son promisorios respecto del uso de residuos de feed lot en combinación con zeolitas en suelos con baja capacidad de retención de agua, donde es posible incrementar la producción de MS a través de una mayor conservación de agua y provisión de N.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado con fondos del proyecto UBACYT 20020120100172BA. Los autores agradecen especialmente a Nicolás Terrera y Federico López por su participación en el experimento, como así también al Ing. Agr. José Lamelas de Tecnoagro S.R.L (Laboratorio INAGRO) por su apoyo y recomendaciones para los análisis de suelos, enmiendas y plantas. También agradecemos a Semillas Picasso S.A. por habernos provisto la semilla de raigrás perenne utilizadas en el experimento.

BIBLIOGRAFÍA

- Aghaalikhani, M., M. Gholamhoseini, A. Dolatabadian; A. Khodaei-Joghan, y K. S. Asilan.** 2011. Zeolite influence on nitrate leaching, nitrogen-use efficiency, yield and yield components of canola in Sandy soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 1-21 p.
- Ashwort, J., D. Keyes, R. Kirk, y R. Lessard.** 2001. Standard procedure in the Hydrometer method for particle size analysis. *Com in Soil Science and plant Analysis* 32:5 633-642
- Ayarra, M.D.** 2011. Balanced scorecard para una compañía de hotelería de ganado. Tesis para optar al grado de Magister en Dirección de Empresas. Universidad del CEMA. 24 pp
- Ball, D.M., C.S Hoveland, y G.D Lacefield.** 2007. Southern forages. Modern concepts for forage crop management. Fourth Edition. International Plant Nutrition Institute (IPNI). Norcross, Georgia. USA. 322 p.
- Basso, L.R, y M.A Herrero.** 2008. Producción animal y medio ambiente. En: *Agrosistemas: impacto ambiental y sustentabilidad*. L. Giuffre (Ed.). Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. p 337-363.
- Berardo, A., y M.A Marino.** 2005. Pasturas y pastizales naturales. En: *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Capítulo 16. E.Echeverría y F.O. García (eds). INTA 525 pp.
- Bolton, A., G.A Studdert, y H.E Echeverría.** 2004. Utilización de estiércol de animals en confinamiento como fuente de recursos para la agricultura. *Rev. Arg. Prod. Anim.* Vol 24 N° 1-2: 53-73.
- Bremner, J.M., y C.S. Mulvaney.** 1982. Nitrogen-Total. En: Page A.L. (Ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 2. Wisconsin. USA. 595-622.
- Carrizo, R., E. Donnari, O. Marcos, y A.Prieri.** 2006. Potencial geológico-minero de ceolitas sedimentarias en el distrito Paganzo. Serie contribuciones técnicas N°29. Provincia de La Rioja. República Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales. SEGEMAR. 28 pp
- Caviglia, O.P, y F.H Andrade.** 2010. Sustainable intensification of agriculture in the Argentinean pampas: capture and use efficiency of environmental resources. *The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology*. 8 pp.
- Caviglia, O.P., R.H.Rizzalli, N.V. Van Opsal, P. Barbieri, R.J.M. Melchiori, A. Cerrudo, V.C. Gregorutti, J.P. Monzón, P.A. Barbagelata, J.J. Martínez, F.O. García, y F.H. Andrade.** 2012. Productividad y eficiencia en el uso del agua y nitrógeno en sistemas intensificados. *IAH N°7* p 6-10.
- Chester, W.A, y E.G Derouane.** 2009. Zeolite characterization and catalysis. Springer. 373 p.
- Civeira, G., y M.B Rodríguez.** 2011. Nitrógeno residual y lixiviado del fertilizante en el sistema suelo-planta zeolitas. *Ciencia del Suelo*. 29 (2): 285-294
- Durán, A., H. Morrás, G. Studdert, y L.I.U. Xiaobing.** 2011. Distribution, properties, land use and management of Mollisols in South America. *Chin. Geogra. Sci.*

21 (5) 511-530.

Ferreira, D.R. y C.P. Schulthess, 2011. The nanopore inner sphere enhancement effect on cation adsorption: sodium, potassium and calcium. SSSAJ. Vol. 75, N° 2.

Gambaud, S., S. Imhoff, M.E. Carrizo, M. Marzetti, y S. Racca. 2014. Uso de efluentes líquidos de tambo para mejorar la productividad de cultivos anuales y la fertilidad del suelo. Ciencia del Suelo (Argentina). 32 (2): 197-208.

García, FO. 2013. La agricultura en el Cono Sur, ¿Qué sabemos, qué debemos conocer?. En: EA. Hoffman; A Ribeiro y H Silva (Eds). III Simposio Nacional de Agricultura. FAGRO (UdelaR). Paysandú, Uruguay. pp.3-19.

Githinji, L.J.M, y J.H. Dane. 2010. Physical and hydraulic properties of inorganic amendments and modeling their effects on water movement in sand-based root zones. Irrig. Sci. DOI 10.1007/s00271-010-0218-4.

Gowariker, V., V.N Krishnamurthy, S. Gowariker, M. Dhanorkkar, y K. Paranjape. 2009. The Fertilizer Encyclopedia. A John Wiley y Sons, INC. 861 pp

Herrero, M y S.B Gil. 2008. Consideraciones ambientales de la intensificación en producción animal. Ecología Austral 18: 273-289.

Hristov, A.N., M. Hanigan, A. Cole, R. Todd, T.A Mc Allister, P.M Ndegwa, y A Rotz. 2011. Review: Ammonia emissions from dairy farms and beef feedlots. Can.J. Anim. Sci 91: 1-35.

Imhoff, S., M.E. Carrizo, R. Martel, V. Lotto, y O. Zen. 2014. Efluentes líquidos de tambo: efectos de su aplicación sobre las propiedades físicas de un Argiudol. Ciencia del Suelo (Argentina). 32 (2): 177-187.

Lavado, R.S, y M.A Taboada, 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(5):150A-153A; doi:10.2489/jswc.64.5.150A

Lavado, R.S, y H.S. Steinbach. 2010. Principales rasgos de la agricultura pampeana. En: Fertilidad de Suelos. Caracterización y manejo en la región pampeana. Sección 1. Capítulo 2. Alvarez, R.; G. Rubio; C. Alvarez; R.Lavado (editores). Editorial Facultad de Agronomía (UBA). 423 p

Marban, L, 2005. Métodos de extracción y determinación de nitratos en suelos. Parte (II). En Tecnologías en análisis de suelos. Capítulo V. L. Marbán y S. Ratto (Eds) Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACS). pp.131-138

[volver al índice](#)

Efecto de la fertilización de largo plazo sobre la exportación y relaciones N, P y S en granos de soja

Liliana Vega Jara¹, Gerardo Rubio^{1,2}, Fernando O. García³, Miguel Boxler⁴ y Flavio H. Gutiérrez Boem^{1,2}

¹Fac. Agronomía UBA, ²INBA-CONICET, ³IPNI, ⁴Región CREA Sur de Santa Fe

*Contacto: vegajara@agro.uba.ar

INTRODUCCIÓN

La necesidad de producir más alimentos y el deterioro de la fertilidad natural de los suelos ha impulsado la necesidad de la fertilización en forma continua por parte de los productores. Estas aplicaciones continuadas modifican la proporción del nutriente agregado en las diferentes fracciones del suelo, incluyendo su contenido en las fracciones lábiles (Ciampitti et al., 2011a). Este cambio en el fraccionamiento de los nutrientes en el suelo, puede variar la respuesta de los cultivos a nuevos eventos de fertilización. En el sur de Santa Fe y Córdoba, este fenómeno fue analizado en detalle para el fósforo (P) (Ciampitti et al., 2011a, b, c) y parcialmente para el nitrógeno (N) (García et al., 2010).

Ensayos de larga duración con esquemas de fertilización combinada permiten detectar los cambios en la concentración de nutrientes en las diferentes fracciones que pueden aportar al diagnóstico de la fertilidad de los distintos ambientes. Una alternativa para diagnosticar la fertilidad del suelo es utilizar a la planta como indicador, tanto en términos absolutos como la relación entre nutrientes en los tejidos vegetales (Sattari et al., 2014). Uno de los órganos más estables de la planta, en términos de contenido de nutrientes, es el grano, considerado como reservorio de nutrientes para la cohorte siguiente (Wardlaw, 1990). El análisis del contenido de nutrientes en los granos puede servir como una herramienta complementaria al análisis de suelos para los diagnósticos de fertilidad (Correndo y García, 2012). El análisis de granos también provee información sobre la exportación de nutrientes y, en consecuencia, sobre el balance de nutrientes de distintos programas de fertilización.

En la campaña 2000/01, la Región Sur de Santa Fe del movimiento CREA, en conjunto con IPNI y Agroservicios Pampeanos (ASP), implantó una red de ensayos a largo plazo. Uno de sus objetivos comunes desde un principio fue determinar las respuestas directas y residuales de los cultivos a la aplicación de N, P y S y así complementar

a los métodos de diagnóstico de la fertilidad de suelos. En este trabajo se sintetizan los resultados obtenidos de análisis de granos de soja de primera y de segunda correspondientes a la campaña 2013/14, después de 14 años de fertilización continuada. Los objetivos fueron evaluar el efecto de los distintos regímenes de fertilización de largo plazo sobre:

- la exportación de N, P, S por el cultivo de soja
- las relaciones entre N, P, y S en granos de soja (N:S, N:P y P:S)

MATERIALES Y MÉTODOS

Se tomaron muestras de granos de los cinco sitios de la Red de Nutrición del CREA de la Región Sur de Santa Fe, durante la campaña 2013/14. Las características de los ensayos son: 2 sitios con rotación maíz-trigo/soja (M-T/S) (Balducci y San Alfredo) y 3 sitios con rotación maíz-soja-trigo/soja (M-S-T/S) (La Blanca, La Hansa y Lambaré). Se evaluaron los 6 tratamientos de la red: Testigo sin fertilizar, NP, NS, PS, NPS y Completo (NPS+micronutrientes). El diseño es en bloques completos aleatorizados con 3 repeticiones en cuatro sitios, y dos en San Alfredo. El tamaño de las parcelas es de 25-30 m de ancho y 65-70 m de largo. Se utiliza maquinaria del productor en todos los casos. La dosis de fertilización se estima a partir de los rendimientos esperados más un 5-10% de fertilización de enriquecimiento con P y S a la siembra de soja y, a partir de modelos zonales para cultivos de alto rendimiento en el caso del N (Boxler et al., 2014).

Se determinó el rendimiento en grano y la concentración en grano de N, P y S (digestión húmeda), seguido de colorimetría para la determinación de N y P y turbidimetría para medir S. Los resultados se analizaron mediante ANOVA, y de regresión. Los ANOVA de rendimiento y de exportación de nutrientes se analizaron para cada sitio por separado, porque hubo heterogeneidad de varianzas entre sitios (Kuehl, 2001). Las diferencias significativas fueron determinadas a un

nivel de significancia del 5% usando la prueba de LSD. Los efectos de los tratamientos sobre la relación entre la exportación de N, P y S y el rendimiento se analizaron mediante regresión lineal. Los efectos de los tratamientos sobre las relaciones entre nutrientes en grano se analizaron con una función potencial. Se compararon las distintas regresiones mediante test de F y, en los casos en que no fueron diferentes, la relación para esos tratamientos se representó con una sola función.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Rendimiento y exportación de N, P y S en granos de soja

Los rendimientos observados variaron entre 2464 y 6126 kg ha⁻¹, dependiendo del sitio y tratamiento (Boxler et al., 2014) (Figura 1). El sitio con rendimientos más altos fue Lambaré (promedio

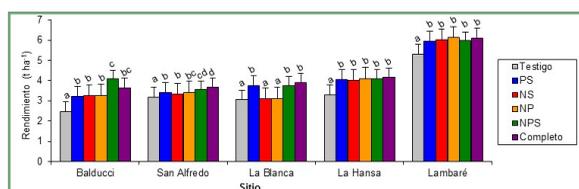


Figura 1. Rendimiento (ton ha⁻¹) del cultivo en cada sitio. Los cambios de letra implican diferencias significativas determinadas mediante LSD a un nivel de 5%, dentro de cada sitio (Boxler et al., 2014)

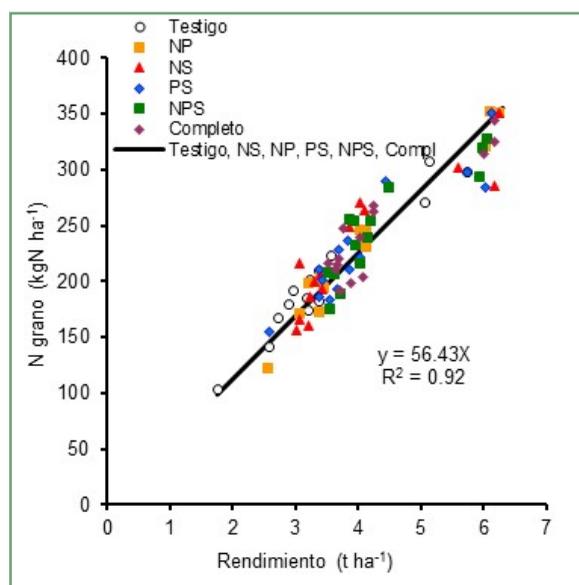


Figura 2. Relación entre exportación de N en granos (kg N ha⁻¹) y el rendimiento del cultivo de soja. La línea corresponde a la función de todos los tratamientos.

5918 kg ha⁻¹), mientras que en los otros cuatro sitios el rendimiento promedio fue entre 3325 y 3951 kg ha⁻¹. Se observó un aumento de los rendimientos debido a la fertilización con N, P y S en todos los sitios (Figura 1). La disminución del rendimiento del tratamiento Testigo respecto del NPS varió entre 10 y 40%. En dos de los cinco sitios, los tratamientos NPS y Completo sobresalieron en rendimiento (Balducci y La Blanca). Estos dos sitios presentaron las deficiencias nutricionales más importantes, con una caída de los rendimientos del 41%, y una interacción positiva entre los nutrientes agregados ($p < 0.05$).

En La Hansa y Lambaré sólo el Testigo fue inferior a los demás tratamientos, y las disminuciones del rendimiento por no aplicar de N, P y S fueron de 19% y 11% respectivamente. Es interesante destacar que en la campaña 2013/14, el P-Bray en los tratamientos sin agregado de P no fue el mismo en todos los sitios. Balducci tuvo el valor más bajo mientras que Lambaré tuvo el más alto (Boxler et al., 2014). Ello explicaría la mayor diferencia de rendimientos entre los tratamientos NPS y NS en Balducci (Figura 1).

El agregado de N en los cultivos antecesores de la soja no aumentó la exportación de N en granos, alcanzaron un promedio de 56.43 kg N t⁻¹ de grano ($r^2 = 0.92$) (Figura 2). Esto puede deberse

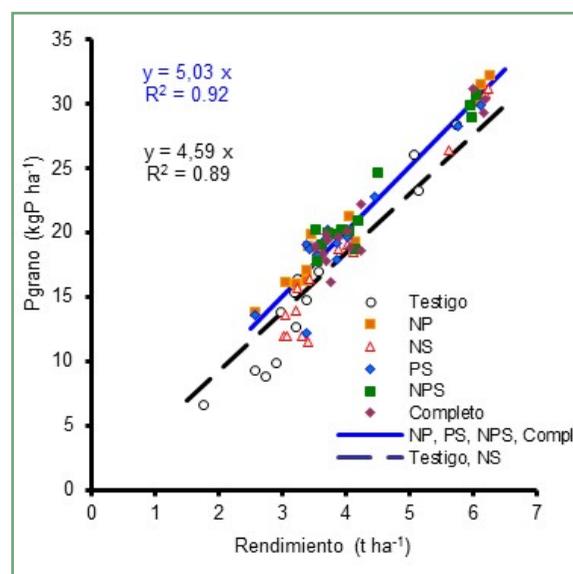


Figura 3. Relación entre exportación de P en granos (kg P ha⁻¹) y el rendimiento (t ha⁻¹) del cultivo de soja. La línea negra punteada corresponde a la función de tratamientos sin fertilizar con P y la línea azul llena a los fertilizados con P.

a que este cultivo cubre la mayor parte del N que requiere mediante la fijación biológica.

La fertilización continuada a largo plazo con P aumentó ligeramente las exportaciones de P en granos en un 9.5%, varió de 4.59 kg P t⁻¹ en los tratamientos sin P agregado (Testigo y NS) a 5.03 kg P t⁻¹ en los tratamientos con P agregado (NP, PS, NPS y Completo) (Figura 3). Esto sugiere que la concentración de P en grano es sensible a la nutrición del cultivo con este nutriente y que podría ser utilizada como un indicador para monitorear un programa de fertilización.

La concentración de S en el grano fue la más sensible al manejo de la fertilización. La fertilización con S aumentó la exportación de S en granos por tonelada en un 23%. Aumentó de 2.08 kg S t⁻¹ en los tratamientos sin S (Testigo y NP) a 2.57 kg S t⁻¹ en los tratamientos con S agregado (PS, NS, NPS, Completo) (Figura 4). Los valores obtenidos en las parcelas no fertilizadas con S se categorizarían como bajos y el de los fertilizados con S como normales según los reportes en literatura (muy bajos: 1.5 - 2 kg t⁻¹, bajos: 2 - 2.3 kg t⁻¹, normales: >2.3 kg S t⁻¹; Hitsuda et al., 2004). Cabe señalar que la concentración de S en granos está relacionada con la composición de la proteína, ya que una mayor concentración de S implica mayor proporción de aminoácidos azufrados como metionina y cisteína (Krishnan, 2008).

2. Relación entre N:P:S en granos de soja

El agregado de P en el largo plazo disminuyó las relaciones N:P hasta en un 30% (Figuras 5 y 8A). Gran parte de este cambio estuvo explicado por los aumentos en contenido de P en granos (19%), ya que el N en los granos sólo se incrementó en un 7% por efectos de la aplicación continua con P.

Lambaré (sitio con mayor rendimiento) tuvo las más bajas relaciones N:P (promedio 10.8) y sin diferencias entre los tratamientos. Balducci (sitio con menor rendimiento) mostró los valores más altos (promedio 14.09). En cuatro de los cinco sitios (sin incluir a Lambaré), el agregado continuo de P bajó las relaciones N:P (Figura 8A). Las bajas relaciones N:P podrían estar relacionados con los mayores rendimientos (Sadras, 2006), y con la capacidad fotosintética y crecimiento de las plantas (Sardans et al., 2012; Ys Jia y MV Gray, 2007). Esta relación fue reportada por algunos investigadores, por lo que han establecido relaciones N:P óptimas para algunos cultivos (With et al., 1999; Diuvenbooden

et al., 1996), que podrían servir como herramienta en las recomendaciones de fertilización.

La fertilización con S provocó aumentos en el contenido de S en grano (23%, Figura 4) y, por lo tanto, cambios en la relación N:S (Figura 6). La caída de la relación N:S se explica por la mayor sensibilidad de la concentración de S en grano al manejo de la fertilización comparado con la concentración de N en grano (Figura 2). En Balducci, La Hansa y Lambaré se ven los mayores efectos de la aplicación del S sobre la relación N:S de los granos,

Desde hace varias décadas, muchos estudios en diferentes leguminosas han mostrado que el contenido de aminoácidos azufrados componentes de la proteína baja marcadamente con deficiencias azufradas (Blagrove et al., 1976; Gaylor y Sykes, 1985), lo que podría explicar las variaciones observadas en nuestros resultados. Estas relaciones N:S en tejidos vegetales fueron investigadas en muchas plantas hace más de 100 años por Liebig (1859), con lo cual logró reconocer la función del S en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Estudios más recientes, plantean la posibilidad de usar la relación N:S para reconocer suelos deficientes en S (Salvagiotti et al., 2012; Reussi. et al., 2010). El contenido de aminoácidos azufrados suele limitar el valor biológico de la proteína de soja, por lo cual la relación N:S de

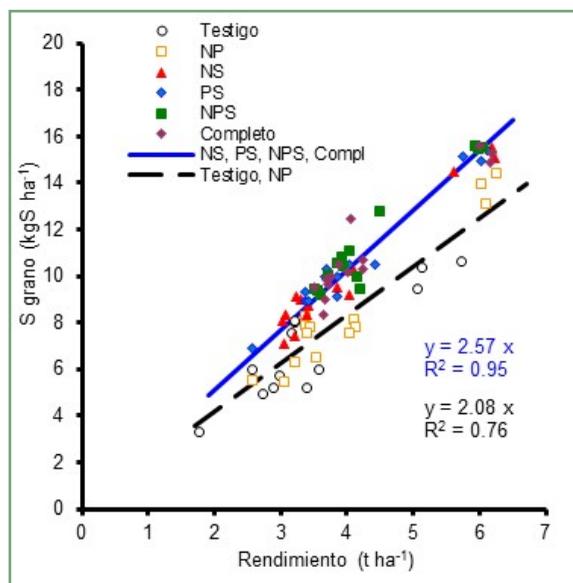


Figura 4. Relación entre exportación de S en granos (kg S ha⁻¹) y el rendimiento (t ha⁻¹) del cultivo de soja. La línea negra punteada corresponde a la función de los no fertilizados con S y la línea azul llena los fertilizados con S.

los granos de soja está relacionada con su valor nutricional (Sexton et al., 2002).

La fertilización de largo plazo con S generó aumentos en la concentración de S en granos de un 23% y de P de un 9.5%. La mayor sensibilidad de la concentración de S explica que los cambios en la relación P:S se deban más al agregado o no de S, que al de P (Figura 7). Analizando todos los

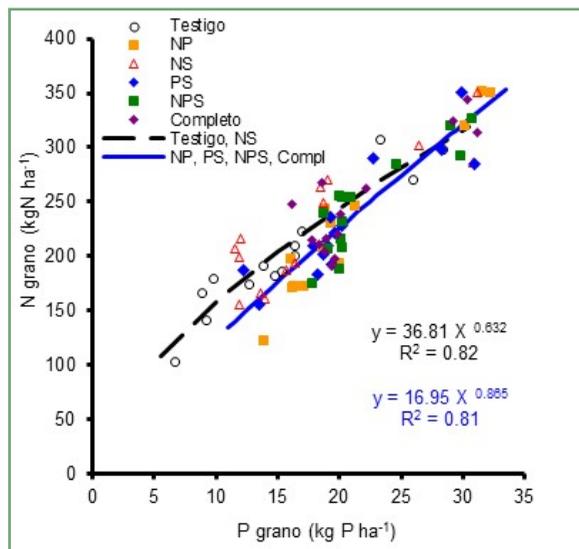


Figura 5. Relación entre exportación de N y P en granos (kg N ha⁻¹) de soja, la línea negra punteada corresponde a la función de los tratamientos sin fertilizar con P y la línea azul llena al de los fertilizados con P.

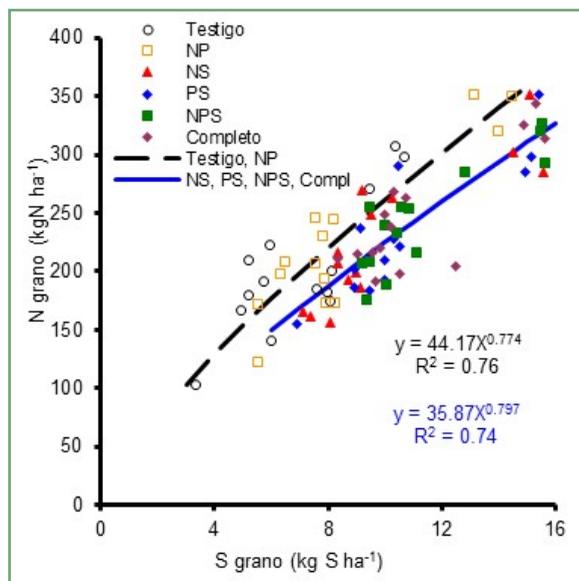


Figura 6. Relación entre exportación de N y S en granos (kg N ha⁻¹) de soja, la línea negra punteada corresponde a la función de los tratamientos sin S y la línea azul llena a la función de regresión de los fertilizados con S.

sitios juntos los tratamientos se agruparon según se haya o no agregado S (i.e. una función para los tratamientos sin S y otra para los tratamientos con S (Figura 7). No se observaron diferencias importantes entre sitios, sin embargo los tratamientos que rindieron más (NPS y Completo) poseen relaciones P:S medias (Figura 7). El P y el S se relacionaron isométricamente (exponente alrededor de 1).

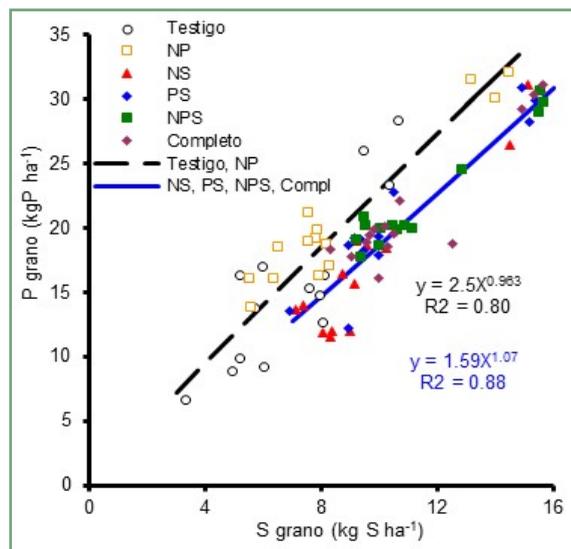


Figura 7. Relación entre exportación de P y S en granos (kg P ha⁻¹) de soja. La línea negra punteada corresponde a la función de los tratamientos sin fertilizar con S y la línea azul llena a la función de regresión de los fertilizados con S.

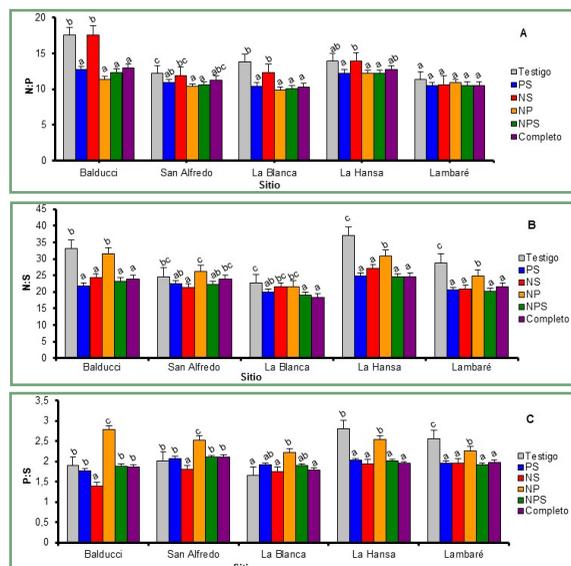


Figura 8: Relación (A) N:P, (B) N:S, y (C) P:S granos entre los tratamientos en todos los sitios. Cambios de letra implican diferencias significativas determinadas mediante LSD a un nivel de 5% en cada sitio.

CONCLUSIONES

Los granos de soja no cambiaron su contenido de N (i.e. proteína) y, por lo tanto, la exportación de N por efectos de fertilización continuada con N, P y S. Sin embargo, los distintos regímenes de fertilización cambiaron la concentración de P y S en el grano y, por lo tanto, su exportación. La concentración de nutriente que mostró mayor sensibilidad al manejo de la fertilización fue la de S.

La fertilización continua de largo plazo con P y S cambió las relaciones entre N:P, N:S y P:S, en los granos, mientras que las aplicaciones con N no influyeron de forma significativa. Tanto la relación N:P como la N:S tendieron a bajar levemente con el aumento de los rendimientos. La sensibilidad de la concentración de S y de la relación N:S al agregado de S como fertilizante, sugiere que la fertilización puede ser una herramienta para modificar la composición de la proteína del grano de soja (i.e. mayor proporción de aminoácidos azufrados), y mejorar así su valor nutricional.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece especialmente a Franco Permingeat por la colaboración en el muestreo a campo de los ensayos y la recolección de muestras. La financiación del presente trabajo provino de UBA, CONICET y ANPCYT.

BIBLIOGRAFÍA

- Blagrove, R.J., J.M. Gillepie, y P.J. Randall.** 1976. Effect of sulphur supply on the seed globulin composition of *Lupinus angustifolius*. *Aust. J. Plant Physiol.*, 3 (1976), pp. 173-184
- Boxler, M., F.O. García, A.A. Correndo, S. Gallo, R. Pozzi, F. Bauschen, N.I. Reussi Calvo y A. Berardo.** 2014. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Resultados de la campaña 2013/2014. IPNI. Disponible on-line en: <http://lacs.ipni.net/topic/research>
- Ciampitti, I. A., L. I. Picone, G. Rubio, y F. O. García.** 2011c. Pathways of Phosphorous Fraction Dynamics in Field Crop Rotations of the Pampas of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 75: 3: 918-926 ISSN: 0361-5995.
- Ciampitti, I. A., F. O. García, L. E. Picone y G. Rubio.** 2011b Soil Carbon and Phosphorus Pools in Field Crop Rotations in Pampean Soils of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75: 616-625. ISSN: 0361-5995.
- Ciampitti, IA, L. E. Picone, F. O. García y G. Rubio.** 2011a Phosphorus Budget and Soil Extractable Dynamics in Field Crop Rotations in Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75: 131-142. ISSN: 0361-5995.
- Correndo, A y F. O. García.** 2012. Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico: cultivos extensivos. IPNI. AA # 14.
- Duivenbooden, N.V., C.T.D. Wit, H.V. Keulen.** 1996. Nitrogen, phosphorus and potassium relations in five major cereals reviewed in respect to fertilizer recommendations using simulation modelling. *Fert. Res.* 44, 37-49.
- Gaylor, G. C. and G. E. Sykes.** 1985. Effects of nutritional stress on the storage proteins of soybeans. *Plant Physiol.*, 78 (1985), pp. 582-585.
- García, F., M. Boxler, J. Minteguiaga, R. Pozzi, L. Firpo, I. Ciampitti, A. Correndo, F. Bauschen, A. Berardo y N. Reussi Calvo.** 2010. La red de nutrición de la región CREA sur de Santa Fe. Resultados y conclusiones de los primeros diez años 2000-2009. AACREA, Buenos Aires, 64p.
- Hitsuda, K., G.J. Sfredo y D. Klepker.** 2004. Diagnosis of sulfur deficiency in soybean using seeds. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1445-1451.
- Kuehl, R.** 2001. Principios estadísticos para el diseño y análisis de investigaciones. Traducido del libro *Design of Experiments* 2nd ed., publicado en inglés por Duxbury. Thomson learning. México. ISBN 970-686-048-7.
- Krishnah, H. B.** 2008. Improving the sulphur-containing amino acids of soybean to enhance its nutritional value in animal feed. American Society of agronomy. *Crop Science Society of America*. 677. USA. ISBN: 978-0-89118-186-6.
- Liebig, J.** 1859. *Letters on Modern Agriculture*, Blyth, J. (ed.). Walton and Maberly, London.
- Reussi, N. I., H. E. Echeverría, y H.R. Sainz Rozas.** 2010. Uso de la relación Nitrógeno: Azufre en grano de trigo como índice de disponibilidad de azufre. Presentado en XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
- Sexton, P. J.; N. C. Paek; S. L. Naeve. y R. M. Shibles.** 2002. Sulfur metabolism and protein quality of soybean. In: *Quality improvement in field crops*. 1st ed. (Eds: Basra,AS; Randhawa,LS) The Haworth Press, 285-308.
- Sadras, V. O.** 2006. The N:P stoichiometry of cereal, grain legume and oilseed crops. *Field Crops Research* Volume 95, Issue 1, 8 January 2006: 13-29.
- Salvagiotti, F., G. Ferraris, A. Quiroga, M. Barraco, H. Vivas, P. Prystupa, H.E. Echeverría, y F.H. Gutiérrez Boem.** 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.
- Sardans, J., y J. Peñuelas.** 2012. The role of plants in the effects of global change on nutrient availability and stoichiometry in the plant-soil system. *Plant Physiol.*, 160 (2012), pp. 1741-1761.
- Sattari, S.Z., M. K. Ittersum, A. F. Bouwman, A. L. Smit y B. H. Janssen.** 2014. Crop yield response to soil fertility and N, P, K inputs in different environments: Testing and improving the QUEFTS model. *Field Crops Research* 157:35-46.
- Wardlaw, I.** 1990. The control of carbon partitioning in plants. *New Phytol*, 116, 341-381.
- Witt, C., A. Dobermann, S. Abdurachman, H. C. Gines, W. Guanghuo, R. Nagarajan, S. Satawatananont, T. Thuc Son, P. Sy Tan, L. Van Tiem, G. C. Simbahan, D. C. Oik.** 1999. Internal nutrient efficiencies of irrigated lowland rice in tropical and subtropical Asia. *Field Crops Res.* 63, 113-138.
- Jia, Y.S., y V. M. Gray.** 2007. The influence N and P supply on the short-term responses to elevated CO₂ in faba bean (*Vicia faba* L.). *South African Journal of Botany*. Volume 73, Issue 3, July 2007, Pages 466-470. ■

[volver al índice](#)

Efecto de la fertilización mineral sobre la actividad microbiana y propiedades químicas en suelos agrícolas de la provincia de Santa Fe - Argentina

Romina Verdenelli^{1,2,*}, Diego Chavarría³, Adrián Rovea⁴, Silvina Vargas Gil³ y José Meriles^{1,2}

¹Instituto Multidisciplinario de Biología Vegetal (IMBIV- CONICET); ²Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos (ICTA. F.C.E.F y N – UNC); ³Instituto de Patología Vegetal (IPAVE-CIAP, INTA) Camino 60 cuadras, Km 5,5 C.P. 5119 Córdoba; ⁴Consortio Regional de Experimentación Agrícola (CREA), Santa Fe, Argentina

*Contacto: rverdenelli@efn.uncor.edu

INTRODUCCIÓN

La calidad del suelo es definida como “la capacidad de un tipo específico de suelo para funcionar -dentro de los límites de un ecosistema natural o disturbado- y sostener la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del agua y del aire, y sustentar la salud humana y su morada” (Doran y Parkin, 1994). El suelo es un sistema abierto y dinámico. En condiciones naturales, los suelos tienden a mantener un equilibrio entre las propiedades físicas, químicas y microbianas con la vegetación natural. (Parr y Papendick, 1997).

Las condiciones ambientales y distintas perturbaciones antrópicas pueden afectar la calidad microbiológica del suelo mediante cambios en la matriz del suelo (Fox y MacDonald, 2003). Los fertilizantes inorgánicos, especialmente el nitrógeno (N), el fósforo (P) y el azufre (S) no sólo sirven para mantener el rendimiento de los cultivos, sino que también son capaces de inducir importantes cambios en las propiedades químicas, físicas y microbiológicas del suelo. Al fertilizar se busca lograr el máximo rendimiento de la manera más eficiente posible. Sin embargo, a menudo, la estrategia de fertilización es puesta en marcha en respuesta a factores económicos, que limitan una fertilización integral y balanceada de los cultivos. Como resultado, se han observado problemas de desbalance en la fertilización con su consecuente pérdida de rendimiento (Chu et al., 2007). Algunos estudios indicaron que los microorganismos del suelo son sensibles a presentar cambios en la composición y en la funcionalidad de las comunidades microbianas con la aplicación de fertilizantes químicos, tratamientos de manejo de suelos y prácticas de cultivos (Bucher y Lanyon 2005; Ge et al., 2008).

Los microorganismos del suelo tienen la habilidad de degradar compuestos orgánicos y

metabolizar productos inorgánicos, contribuyendo de especial manera a la mineralización de nutrientes los cuales, juegan un rol preponderante en el mantenimiento de la productividad (Lin et al., 2004). Están involucrados en todos los procesos bioquímicos que ocurren en los suelos como la descomposición de la materia orgánica, formación de humus y transformación y ciclo de nutrientes. (Smith y Paul, 1990) También mejoran las propiedades físicas del suelo, tales como la estructura, porosidad, aireación e infiltración mediante la formación y estabilización de los agregados del suelo. De esta manera, los microorganismos y las comunidades microbianas pueden proveer una medida integral de la calidad del suelo, un aspecto que no siempre es revelado con el mero examen físico y químico y/o el análisis de organismos superiores.

La información disponible acerca del efecto de los fertilizantes químicos sobre diferentes parámetros microbianos es contradictoria e incierta. Algunos estudios han demostrado que las diferentes estrategias de fertilización inorgánica pueden incrementar la biomasa microbiana, aumentar o disminuir su actividad, afectando la tasa de descomposición y modificando la estructura de las comunidades microbianas (Belay et al., 2002; Masto et al., 2006; Wyngaard et al., 2012). Diferentes autores mostraron que la actividad enzimática del suelo fue un sensible indicador de los efectos del manejo agrícola después de un experimento a largo plazo con fertilizantes (Pascual et al., 2000; Bastida et al., 2007). Durante la última década se ha demostrado que la diversidad microbiana del suelo puede ser afectada por diferentes disturbos, entre ellos el uso de fertilizantes. Dado el creciente uso de fertilizantes minerales en ecosistemas agrícolas de Argentina y del mundo, el estudio de las comunidades microbianas de suelo en relación a la aplicación de estos productos, es de fundamental importancia para reducir enferme-

dades en los cultivos, aumentar la producción y optimizar la sustentabilidad del ambiente. El objetivo del presente trabajo fue estudiar el impacto de la aplicación de combinaciones de diferentes fertilizantes inorgánicos (N, P, S y micronutrientes) en dosis recomendada a campo sobre la actividad de las comunidades microbianas del suelo y las propiedades químicas de suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se encuentra ubicado en Teodelina (Departamento Gral. Lopez, provincia de Santa Fe- Argentina), y pertenece a la Red de Nutrición de Largo Plazo de la Región CREA Sur de Santa Fe en conjunto con IPNI Cono Sur y el patrocinio de Agro-Servicios Pampeanos S.A. El suelo es un Hapludol típico serie Santa Isabel. Los experimentos se iniciaron en la campaña 2000/01, bajo un diseño en bloques completos al azar con tres repeticiones, en un sistema de siembra directa con rotación maíz-trigo/soja de segunda. Los fertilizantes minerales utilizados fueron nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S). Los tratamientos consistieron en cinco diferentes combinaciones de nutrientes: PS, NS, NP, NPS, NPS+micronutrientes (Magnesio, Boro, Zinc y Cobre) y un tratamiento testigo (T) sin fertilizante. Las dosis de nutrientes se deciden año a año estimándose a partir del rendimiento esperado del cultivo y la disponibilidad en el suelo para N, mientras que P y S se manejan según un criterio de reposición más un 5-10% en concepto de construcción de fertilidad. Los fertilizantes se aplican en pre-siembra o siembra en mezclas físicas.

El muestreo de suelo se desarrolló previo a la cosecha de maíz en la campaña 2012/13, en el mes de marzo. Para el mismo se tomaron 6 muestras en cruz en cada réplica, con las que se conformó una muestra compuesta, representativa de la parcela-réplica. A partir de las muestras de suelo se realizó la determinación de variables microbiológicas y químicas. Se determinó el pH con un equipo Hanna HI8314. Se realizó la determinación con una relación suelo: solución extractora 1:2.5. Se suspendieron 8 g de suelo en 20 ml de agua bidestilada, se agitó por 30 segundos y se dejó en reposo durante 2 hs. (Norma IRAM, 2009). El carbono (C) total se cuantificó mediante el autoanalizador PE2400 SERIE II C, H, N, S. Perkin Elmer. Se transformó el contenido de C orgánico a contenido de materia orgánica (MO, %), mediante la relación: % MO= %C x 1.724. Luego

fue calculada en mg/g de suelo (Walkley y Black, 1934). La estimación de la actividad microbiana de las muestras de suelo se realizó mediante la hidrólisis de diacetato de fluoresceína (FDA) de acuerdo a Adán y Duncan 2001. La actividad deshidrogenasa se determinó de acuerdo a la técnica citada por García et al. 1997. Análisis estadísticos: se utilizó el programa InfoStat (Di Rienzo et al., 2013). En todos los parámetros medidos se realizó un análisis de modelos lineales a un factor con bloque y test de comparaciones múltiples (DGS; $p \leq 0.05$). En todos los casos se verificó la normalidad e independencia de datos y la homogeneidad de varianzas. Los gráficos se realizaron con el programa Microsoft Excel 2007.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades químicas

N total

Se observaron diferencias significativas entre los tratamientos fertilizantes con respecto al testigo. Entre los tratamientos fertilizantes no se encontraron diferencias significativas (**Figura 1**). Estos resultados coinciden con los encontrados por Abbasi y Khizar (2012), quienes observaron un incremento del N total en suelos tratados con N (urea) en relación al testigo sin N. El tratamiento PS, si bien registró un menor nivel de N total, no presentó diferencias significativas con el resto de los tratamientos a los cuales se les incorporo N. Este resultado podría relacionarse al hecho de que en la fuente de P utilizada (fosfato monoamónico) contiene N (grado 11-23-0) (García et al., 2010).

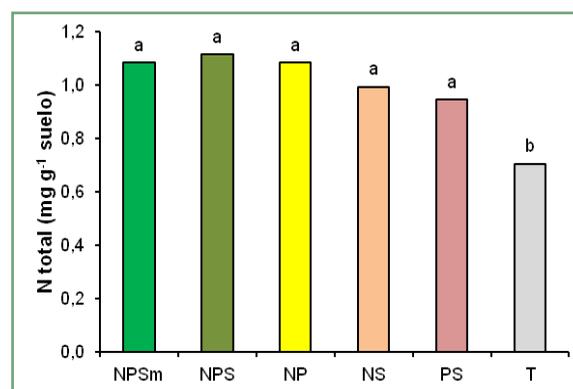


Figura 1. Contenido de N total (mg g⁻¹ suelo) según tratamiento de fertilización. Resultados con mismas letras no difieren significativamente $p < 0.05$. Campaña 2012/13, maíz. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe-IPNI-ASP.

Contenido de materia orgánica

Los tratamientos NPS, NPSm, NS y PS mostraron un incremento significativo del contenido de MO en relación a los tratamientos T, NS, PS y NP. (Figura 2). Resultados similares fueron observados por otros autores (Masto et al., 2006), quienes observaron una relación entre el incremento de MO y el incremento de la cantidad y variedad de nutrientes incorporados al suelo. Por su parte, Kong et al. (2008) observaron que un tratamiento NPK mostró mayor contenido de MO del suelo, mientras que el tratamiento testigo mostró la más baja. La aplicación de N es capaz de incrementar la producción de residuos orgánicos al suelo mediante el aumento de la biomasa aérea y radicular de las plantas (Strada y Echeverría 2000).

S total

El S ha sido reconocido como un elemento esencial para el crecimiento de las plantas y como un importante factor limitante en la producción de cultivos (Schlegel et al. 2005). Se observó un incremento significativo del contenido de S total en los tratamientos a los que se les aplicó S como fuente fertilizante en relación al T y NP. (Figura 3). Estos resultados coinciden con los encontrados por Barraco et al. (2013), en cuyo estudio observaron que los niveles de S de los suelos se incrementaron mediante el agregado de las diferentes dosis de S, fundamentalmente en la capa de 0 a 20 cm.

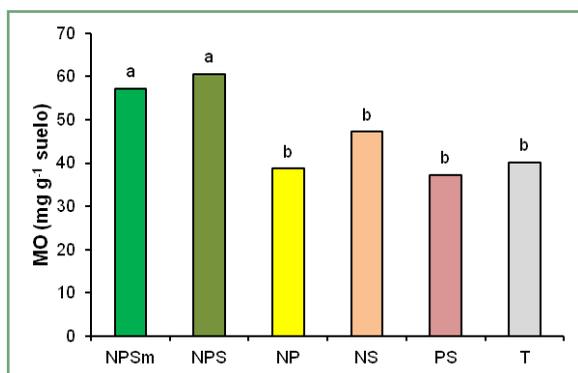


Figura 2. Contenido de MO (mg g⁻¹ suelo) según tratamiento de fertilización. Resultados con mismas letras no difieren significativamente $p < 0.05$. Campaña 2012/13, maíz. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe-IPNI-ASP.

P total

En nutrientes como el P de poca movilidad en la solución del suelo, se pueden aprovechar los efectos residuales en los cultivos posteriores de una secuencia existiendo evidencias que muestran que estos efectos residuales pueden observarse más allá del cultivo siguiente (Fontanetto et al., 2003). Por este motivo, el mayor contenido de P observado en los tratamientos fosforados en relación a los tratamientos sin P (T y NS), podría estar relacionado con la residualidad de este nutriente (Figura 4).

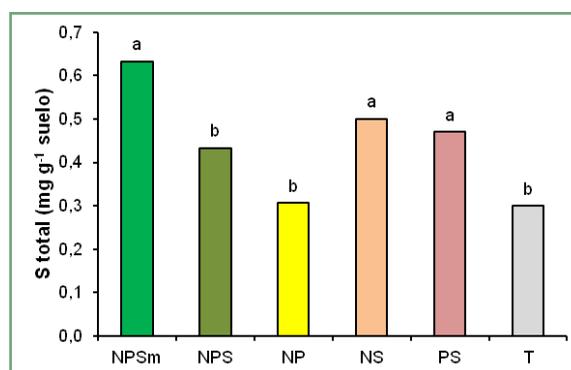


Figura 3. Contenido de S total (mg g⁻¹ suelo) según tratamiento de fertilización. Resultados con mismas letras no difieren significativamente $p < 0.05$. Campaña 2012/13, maíz. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe-IPNI-ASP.

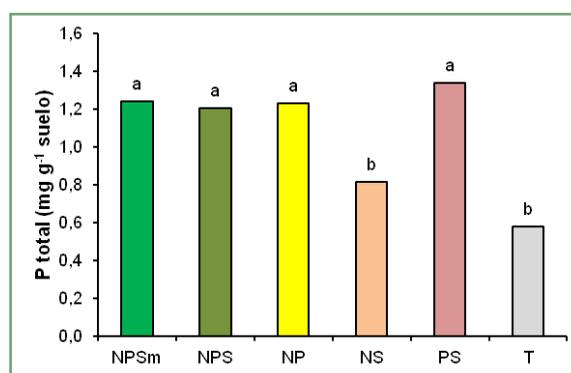


Figura 4. Contenido de P total (mg de P g⁻¹ suelo) según tratamiento de fertilización. Resultados con mismas letras no difieren significativamente $p < 0.05$. Campaña 2012/13, maíz. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe-IPNI-ASP.

Actividad microbiana

Actividad de la enzima hidrolizante del diacetato de fluoresceína (FDA)

La hidrólisis FDA proporciona información sobre la actividad microbiana total, debido a que este sustrato es digerido por exoenzimas y enzimas unidas a la membrana (Adam y Duncan, 2001). En este experimento se observó un incremento significativo de FDA en todos los tratamientos con fertilizantes en comparación con el testigo (**Figura 5**). Estos resultados sugieren que la fertilización mineral del suelo puede jugar un papel importante en la regulación de estas enzimas generalistas. Generalmente las actividades enzimáticas en el suelo están estrechamente relacionadas con el contenido de MO y N total del suelo (Taylor et al., 2002).

Actividad deshidrogenasa (DH)

La determinación de la actividad de la deshidrogenasa (DH) es un reflejo de las actividades oxidativas de la microflora del suelo (Ladd, 1978). La actividad DH ha sido propuesta como un indicador de la actividad biológica de un suelo y es uno de los métodos comúnmente usados para determinar la actividad de los microorganismos (Casida et al., 1964; Skujins, 1976; Trevors, 1984). En este experimento, se observó un incremento de la actividad de esta enzima en los tratamientos T y PS. (**Figura 6**). Este aumento de actividad es contradictorio con los resultados encontrados por otros autores (Mandal et al., 2007). En este sentido, otros autores observaron un aumento

proporcional de la actividad deshidrogenasa en relación a la diversidad y cantidad de nutrientes (Manjaiah y Singh, 2001; Mastro et al., 2006). Esa tendencia no se ve reflejada en los resultados encontrados en la campaña analizada. En el presente trabajo, el pH mostró una tendencia general a la acidificación. El tratamiento Testigo presentó un pH significativamente más alto (6.21 ± 0.03) en relación a los tratamientos fertilizantes (resultados no mostrados). Esta posible relación tendría que ser objeto de estudio en próximos trabajos.

Rendimiento

El rendimiento del cultivo de maíz tuvo una respuesta significativamente mayor en los tratamientos a los cuales se les incorpora como fertilizante N (Boxler et al., 2013) (**Figura 7**). Por tratarse de ensayos a largo plazo, en los cuales los tratamientos se repiten siempre sobre las mismas parcelas, los rendimientos de los diferentes tratamientos no solo responden al efecto directo de fertilización del año sino fundamentalmente a la “acumulación de fertilidad”, resultado de los efectos residuales de aplicaciones de años anteriores. Por otra parte, los mayores rendimientos obtenidos en los tratamientos fertilizados se asocian a mayores acumulaciones de rastrojos que proveen mayor cobertura al suelo disminuyendo las pérdidas de agua por menor evaporación e incorporando una mayor cantidad de C al suelo. (García et al., 2010). La aplicación de fertilizantes inorgánicos incrementa la fertilidad del suelo y aumenta la producción de los cultivos, especialmente si son a base de N y P (Vargas Gil et al., 2009).

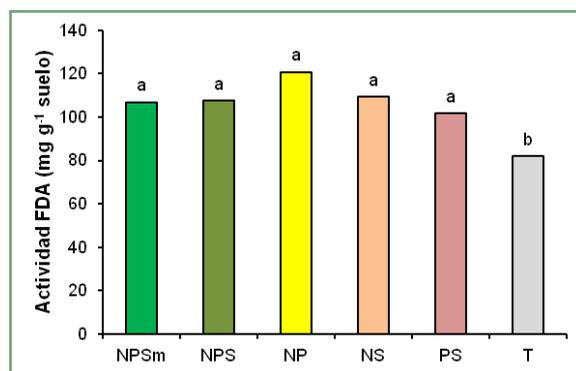


Figura 5. Actividad de la enzima de di acetato de fluoresceína (FDA) ($\text{mg de fluoresceína g}^{-1}$ suelo) según tratamiento de fertilización. Resultados con mismas letras no difieren significativamente $p < 0.05$. Campaña 2012/13, maíz. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe-IPNI-ASP.

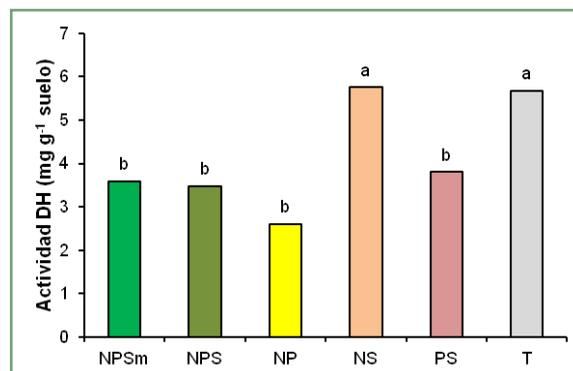


Figura 6. Actividad Deshidrogenasa (DH) (mg de INTF g^{-1} suelo) según tratamiento de fertilización. Resultados con mismas letras no difieren significativamente $p < 0.05$. Campaña 2012/13, maíz. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe-IPNI-ASP.

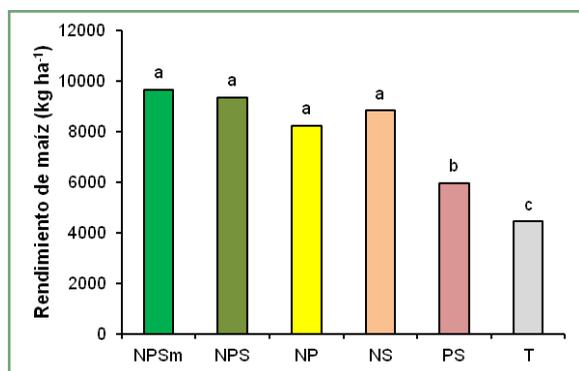


Figura 7. Rendimiento en grano de maíz (kg ha⁻¹) según tratamiento de fertilización. Resultados con mismas letras no difieren significativamente ($p < 0.05$). Campaña 2012/13, maíz. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe-IPNI-ASP.

CONCLUSIÓN

En conclusión, este estudio examinó las consecuencias de la aplicación de fertilizantes minerales en la actividad microbiana y en propiedades químicas del suelo bajo un sistema de agricultura de conservación. La aplicación de fuentes adicionales a los fertilizantes N, P y S (NPSm), seguido del tratamiento triple NPS, presentaron mayor contenido de MO y rendimientos máximos en relación a la mayoría de los tratamientos combinados dobles y el testigo. En general se observó un incremento de las reservas totales en el suelo en los nutrientes N, P y S en los tratamientos fertilizados en relación al testigo. La actividad FDA incrementó con la fertilización. La comprensión del efecto que tienen distintas prácticas culturales como la fertilización sobre la función de las comunidades microbianas del suelo y el efecto en los contenidos de nutrientes esenciales para los cultivos, trae aparejado la capacidad de entender los mecanismos involucrados para hacer más eficiente el uso sostenido de los recursos y aumentar la fertilidad del suelo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado a través del aporte de los siguientes subsidios de investigación: Programa Nacional de Suelos de INTA (PNSUELO 1134043); además CONICET y SeCyT-UNC también financiaron este trabajo. Agradecemos al Grupo Región CREA Sur de Santa Fe, Ings. Agrs.: Santiago Gallo (coordinador regional Sur de Santa Fe), Santiago Rodríguez (asesor CREA Teodelina), Fernando García (IPNI Cono Sur), Miguel Boxler (CREA Sur de Santa Fe) y al Establecimiento Balducchi Hnos. en Teodelina.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbasi M.K., y A. Khizar.** 2012. Microbial biomass carbon and nitrogen transformations in a loam soil amended with organic-inorganic N sources and their effect on growth and N-uptake in maize. *Ecological Engineering*, volumen 39: 123-132.
- Adam. G., y H. Duncan.** 2001. Development of a sensitive and rapid method for measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils. *Soil Biol. Biochem.*, volumen 33: 943-951.
- Barraco, M., A. Lardone, y C. Scianca.** 2013. Fertilización con azufre en la secuencia trigo/soja de segunda. Memoria Técnica 2012-2013 ISSN 1850-6038. Área de Investigación Agropecuaria EEA INTA General Villegas.
- Bastida, F., J.L. Moreno, T. Hernández, y C. García.** 2007. The long-term effects of the management of a forest soil on its carbon content, microbial biomass and activity under a semi-arid climate. *Applied Soil Ecology*, volumen 37: 53-62.
- Belay, A., A.S. Claassens, y F.C. Wehner.** 2002. Effect of direct nitrogen and potassium and residual phosphorus fertilizers on soil chemical properties, microbial components and maize yield under long-term crop rotation. *Biol. Fertil. Soils* volume 35: 420-427
- Boxler, M., F. García, A. Correndo, S. Gallo, R. Pozzi, M. Uranga, F. Bauschen, H. Rivero, N. Reussi Calvo, y A. Berardo.** 2013. Resultados de la campaña 2012/13: Maíz. Red de Ensayos en Nutrición de Cultivos Región CREA Sur de Santa Fe. Disponible en: <http://research.ipni.net/page/RLAS-2476>
- Bucher, A.E., y L.E. Lanyon.** 2005. Evaluating soil managements with microbial community-level physiological profiles. *Appl Soil Ecol.*, volumen 29: 59-71
- Chu, H., X. Lin, T. Fujii, S. Morimoto, K. Yagi, J. Hu, y **J. Zhang.** 2007. Soil microbial biomass, dehydrogenase activity, bacterial community structure in response to long-term fertilizer management. *Soil Biol. Biochem.* volumen 39: 2971-2976.
- Di Rienzo, J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, y C.W. Robledo.** 2013. InfoStat versión 2013. Grupo InfoStat, FCA, Universidad

Nacional de Córdoba, Argentina.

Doran, J.W., y T.B. Parkin. 1994. Denying and assessing soil quality. En: Doran, J.W. (Ed.). Denying Soil Quality for sustainable Environment, SSSA Special Publication, 35SSSA and ASA, Madison, WI, 3-23.

Fontanetto, H., H. Vivas, R. Albrecht, y J. L. Hotian. 2003. La fertilización con N, P y S y su residualidad en un sistema agrícola de la Región Central de Santa Fe. 1- efecto sobre rendimientos de granos. Información técnica de los cultivos de verano. Campaña 2003. Publicación Miscelánea N° 100. INTA Rafaela.

Fox, C.A., y K.B. MacDonald. 2003. Challenges related to soil biodiversity research in agroecosystems - Issues within the context of scale of observation. Canadian Journal of Soil Science, volumen 83: 231-244

García, C., M.T. Hernández, y F. Costa. 1997. Potential use of dehydrogenase activity as an index of microbial activity in degraded soils. Commun. Soil Sci. Plant Anal, volumen 28: 123-134.

García, F., M. Boxler, J. Minteguiaga, R. Pozzi, L. Firpo, I. Ciampitti, A. Correndo, F. Bauschen, A. Berardo, y N. Reussi Calvo. 2010. En: La Red de Nutrición de la Región Crea Sur de Santa Fe: Resultados y conclusiones de los primeros diez años 200-2009. 2a. ed. AACREA. Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-1513-07-9. 64 pág.

Ge, Y., J.B. Zhang, L.M. Zhang, M. Yang, y J.Z. He. 2008. Long-term fertilization regimes affect bacterial community structure and diversity of an agricultural soil in northern China. J. Soils Sediments, volumen 8: 43-50.

Kong, W.D., Y. Zhu, B.J. Fu, X.Z. Han., I. Zhang, y J.Z. He. 2008. Effect of Long-Term Application of Chemical Fertilizers on Microbial Biomass and Functional Diversity of a Black Soil. Pedosphere, volumen 18: 801-808.

Lin, X.G., R. Yin, H.Y. Zhang, J.F. Huang, R.R. Chen, y Z.H. Cao. 2004. Changes of soil microbiological properties caused by land use changing from rice-wheat rotation to vegetable cultivation. Environ. Geochem. Health, volumen 26, 119-128.

Mandal, A., K.A. Patra, D. Singh, A. Swarup, y R.E. Mastro, 2007. Effect of long-term application of manure and fertilizer on biological and biochemical activities in soil during crop development stages. Bioresource Technology, volumen 98: 3585-3592

Manjaiah, K.M., y D. Singh. 2001. Soil organic matter and biological properties after 26 years of maize-wheat-cowpea cropping as affected by manure and fertilization in a cambisol in semiarid region of India. Agric. Ecosyst. Environ., volumen 86: 155-162.

Masto E.R., K.P. Chhonkar, D. Singh, y K.A. Patra. 2006. Changes in soil biological and biochemical characteristics in a long-term field trial on a sub-tropical inceptisol. Soil Biology and Biochemistry, volumen 38: 1577-1582

Parr, J.F., y R.I. Papendick. 1997. Soil quality: relationship and strategies for sustainable dryland farming systems. Annals of Arid Zones, volumen 36: 181-191

Pascual, J.A., C. Garcia, T. Hernandez, J.L. Moreno, y M. Ros. 2000. Soil microbial activity as a biomarker of degradation and remediation processes. Soil Biology & Biochemistry, volumen 32: 1877-1883

Schlegel, A.J , C.A. Grant, y J.L. Havlin. 2005. Challenging Approaches to Nitrogen Fertilizer Recommendations in Continuous Cropping Systems in the Great Plains. Agronomy Journal, volumen 97: 391-398.

Smith, J.L., y E.A. Paul. 1990. The significance of soil microbial biomass estimations. En: Stotzki, G. Bollag, J.M. (Eds.) Soil Biochemistry, vol 6. Marcel Dekker, New York,. 357-396.

Strada, R.A., H.E. Echeverria, y G.A. Studdert. 2000. Relationship between the grain yield and the stem nitrate concentration of wheat varieties. Ciencia del Suelo, volumen 18: 64-68.

Taylor, J.P., B. Wilson, M.S. Mills, y R.G. Burns. 2002. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques. Soil Biol. Biochem, volumen 34: 387-410

Vargas Gil, S., A. Becker, C. Oddino, M. Zuza, A. Marinelli, y G. March. 2009. Field trial assessment of biological, chemical, and physical responses of soil to tillage intensity, fertilization, and grazing. Environmental Management, volumen 44: 378-386.

Walkley, A., y I. Black. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci., volumen 37: 29-37

Wyngaard, N., H.E. Echeverria, H.R. Sainz Rozas, y G.A. Divito. 2012. Fertilization and tillage effects on soil properties and maize yield in a Southern Pampas Argiudoll. Soil & Tillage Research, volumen 119: 22-30. ■

[volver al índice](#)

Fertilización con fósforo y azufre en dos variedades de alfalfa sobre un suelo deficiente de San Cristobal, Santa Fe

Hugo S. Vivas, Luis Romero y Juan Ibarlucea
INTA EEA Rafaela. Ruta 34. Km 227. Rafaela, Santa Fe.
*Contacto: hvivas@arnet.com.ar

INTRODUCCIÓN

La alfalfa es la leguminosa forrajera más productiva y nutritiva que se dispone en Argentina y en el mundo (Hijano y Basigalup, 1995; Russelle, 2001) y el centro de la provincia de Santa Fe participa con una gran superficie de la misma para la producción de leche y carne. La materia seca (MS) producida está en función de numerosos factores entre los cuales la nutrición del suelo a través de la fertilización es uno de los más relevantes. Otras variables agronómicas y ambientales que bajo sistemas de secano se pueden citar son la calidad de los suelos, donde la alfalfa se adapta a un amplio rango de clases, la distribución de las precipitaciones, el control de las malezas, variedades, enfermedades, etc.

En el año 2010 se detectaron suelos con valores inferiores a 25 mg kg^{-1} de fósforo extractable (Pe), considerados insuficientes para la producción de alfalfa (Knudsen y Rehm, 1977; Racca et al., 2001), en las cercanías de la localidad de San Cristóbal, en la periferia del domo occidental de la provincia. Si el área con dichas características se extiende, constituirá una amplitud de la señalada por Darwich (1983) y García (2001) para suelos deficientes de P dentro de la provincia de Santa Fe. La deficiencia de este nutriente constituye un grave problema para los sistemas productivos y es necesario investigar su magnitud para transferir las posibles soluciones a suelos con similares condiciones nutricionales.

En la región centro de Santa Fe se comenzó a investigar y generar información sobre fertilización de alfalfa en la campaña 1994/95 y los primeros resultados estimularon la continuidad a través de los años (Vivas, 1995; Vivas y Guaita, 1997a; b; Vivas y Quaino, 2000; Vivas y Romero, 2004). En los primeros años, el P fue el factor dominante por la evidencia de las respuestas. Deficiente en el centro y el este, pero suficiente en el oeste. Nutriente imprescindible para la transferencia energética, la planta lo absorbe del suelo como

elementos inorgánicos denominados iones ortofosfatos (H_2PO_4^- o HPO_4^{2-}) de buena efectividad para estimular un rápido sistema radicular. El H_2PO_4^- es la forma dominante a pH ligeramente ácido o neutro, por el contrario el HPO_4^{2-} lo es a pH más alcalinos. El P contribuye a la fijación del anhídrido carbónico y facilita la fijación del nitrógeno (N) atmosférico a través de la enzima nitrogenasa (Lanyon y Griffith, 1988). A diferencia del N, el P como fosfato (PO_4^{3-}) no puede ser fijado desde la atmósfera y su corrección solo es posible a través de la aplicación de fertilizantes (Culot, 1986). Como nutriente nativo se encuentra en la materia orgánica (MO) y en muy baja concentración en la solución inorgánica del suelo, desde donde las plantas lo absorben (Ozanne, 1980). Son necesarios valores apropiados de la fracción inorgánica, para lograr un rápido crecimiento y desarrollo de las plántulas y una adecuada producción de forraje. El P se recicla alrededor del 40% en los residuos y 60-70% a través del bosteo animal (Barrow, 1975). Se mantiene en superficie con muy poca movilidad y es incorporado por la microfauna o los procesos mecánicos de siembra. La deficiencia de P en alfalfa se manifiesta por la restricción del crecimiento y la altura de las plantas. Es un nutriente estratégico, pues no se produce en Argentina por ausencia de roca fosfórica.

Por la asociación del P con el azufre (S) y por estar igualmente relacionados a las proteínas de la alfalfa se decidió utilizar ambos como fertilizantes, por la respuesta encontrada en otros sitios por Vivas et al. (2001). En la planta, el S se absorbe bajo la forma de azufre de sulfatos (S-SO_4^{2-}). Por la relación de estructura química entre los fosfatos y los sulfatos en el suelo, la fertilización fosfatada contribuiría a liberar sulfatos (SO_4^{2-}) adsorbidos en las arcillas del suelo, aumentando su disponibilidad para la planta (Chao et al., 1962). Esta hipótesis luego fue constatada en laboratorio por Hoeft et al. (1973), quienes experimentaron y demostraron la capacidad del P en solución como

extractante del S. Los síntomas de deficiencia de S en la planta se manifiestan como clorosis o falta de N en las hojas superiores debido a que los SO_4^{2-} absorbidos no son suficientes y dada la escasa movilidad no migran a las hojas superiores más jóvenes.

A diferencia de los PO_4^- , muy poco móviles en el suelo, los SO_4^{2-} tienen movilidad equivalente al nitrógeno de nitratos (N-NO_3^-) (Havlin et al., 1999). Un suelo se considera deficiente cuando contiene menos de 10 mg kg^{-1} de S-SO_4^{2-} . No obstante, algunas técnicas de análisis no tienen la precisión suficiente y existen muchas variaciones en los resultados. Por ello, la búsqueda de alternativas para mejorar el diagnóstico de suelos deficientes como el índice de deficiencia de S (IDS) ofrecido por Salvagiotti et al. (2012). Por la movilidad del S se observó que migra gradualmente y tiende a acumularse alrededor de los 60 cm de profundidad donde hay mayor concentración de arcillas (Vivas, et al., 2000; 2010, inédito). Según Spencer (1975), la alfalfa puede demandar rangos de $30\text{-}70 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de S o más. Entre las primeras respuestas positivas de la fertilización de alfalfa con S en el centro de Santa Fe se pueden mencionar, entre otras a Vivas et al. (2001) y Vivas y Romero (2004). El S como fertilizante, a diferencia del P no se destaca por tener un gran efecto arrancador.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la producción de forraje de dos variedades de alfalfa fertilizadas con P y S, separados y combinados, para un sitio del domo occidental con bajos niveles de Pe y sin antecedentes de fertilización.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se instaló en la localidad de San Cristobal, Departamento del mismo nombre, sobre un suelo Clase 3/4ws y un índice de aptitud 58. Corresponde a la Unidad Cartográfica PEA 31, serie Petronila 31 (Argiudol ácuico, arcillosa fina, mixta, térmica), integrado por los complejos: Petronila, PEA 40%, María Luisa, MLA 20%, Cululú, CUL 20%, Río Salado, RSA10% y Jacinto Arauz, JAZ10%.

El suelo fue muestreado con un barreno hidráulico en todo el perfil. La secuencia de horizontes fue: A= 0-16 cm, B21t= 16-32cm, B22t= 33-43cm, B23= 43-68cm, B31= 68-88cm, B32= 88-120cm y C= > a 120 cm. Se analizó el P por Bray I, la MO, la conductividad eléctrica (CE), el pH y el contenido de azufre como S-SO_4^{2-} por turbidimetría. El contenido de Pe, según el orden de los horizontes

fue 9.4, 3.2, 12.3, 23.6, 40.1, 40.1 y 50.5 mg kg^{-1} , respectivamente. Los valores de S-SO_4^{2-} fueron de 32.2, 30.7, 68.4, 111.5, 153, 118.5 y 85 mg kg^{-1} , respectivamente. Según los datos analíticos el contenido de Pe en los primeros cuatro horizontes fue inferior a los 25 mg kg^{-1} necesarios para una óptima producción de alfalfa.

En contraste, el nivel de S-SO_4^{2-} fue muy alto en todos los horizontes, superando los $10\text{-}15 \text{ mg kg}^{-1}$ considerados como referencia. Dada la poca certeza en la técnica de análisis para S-SO_4^{2-} , a la hora de establecer umbrales de respuesta, igualmente se decidió utilizar el S como tratamiento.

Referido al manejo del cultivo, posterior a la aplicación de glifosato (2.5 l ha^{-1}) como barbecho químico, el laboreo convencional a nivel productor comprendió pasajes de rastra de discos liviano y dientes. La fertilización con P y S se realizó al momento de la siembra (28-04-2010) aplicando al voleo con remoción del suelo e incorporación superficial. El P fertilizante se aplicó bajo la forma de superfosfato triple de calcio ($\text{P= } 20\%$) $\text{P40= } 40 \text{ kg P ha}^{-1}$ y el S bajo la forma de yeso agrícola ($\text{S= } 20\%$) $\text{S40= } 40 \text{ kg P ha}^{-1}$. Se utilizaron dos variedades de alfalfa: Supermonarca INTA-Produsem y GAPP 969+. Supermonarca es una variedad del Grupo 8 que según sus creadores supera a numerosas variedades tradicionales, tiene un porte semierecto y gran foliosidad. Por su parte GAPP 969+ es una variedad del Grupo 9, de porte erecto, muy foliosa y adaptada para sistemas de alta producción de leche o carne. Como herbicida preemergente se utilizó Preside ($0,4 \text{ l ha}^{-1}\text{-p.a.} = \text{flumetsulam}$) y como post-emergente en la primavera de cada año el gramínicida Select ($0,650 \text{ l ha}^{-1}\text{-p.a.} = \text{cletodim}$). Para la protección de insectos se hicieron 3 aplicaciones por año de Alstystin ($0.05 \text{ l ha}^{-1}\text{- p.a.} = \text{triflumuron}$).

Se utilizó un diseño de parcelas divididas en bloques completos al azar con tres repeticiones. La gran parcela fueron las Variedades (Supermonarca INTA-Produsem y GAPP 969+) y como subparcelas los tratamientos: Testigo, P40, S40 y P40+S40. A partir del 13-10-11 las dosis de P y S fueron repetidas. Las unidades experimentales fueron de $1 \text{ m} \times 5 \text{ m}$, evaluándose el total de la parcela cuando la alfalfa se encontraba en el estado de botón floral o con rebrotes basales no mayores de 5 cm. Se evitó el efecto borduras mediante la siembra de parcelas extras con dicho propósito. Luego del 7° corte se analizó nuevamente el suelo (0-20 cm) para P de en todos los tratamientos. Como en su mayoría

no alcanzaban los valores recomendados, el 13-10-11 se repitieron las dosis iniciales de fertilizante tanto de P (40 kg P ha^{-1}) como de S (40 kg S ha^{-1}) solos y combinados. En este trabajo se evaluaron 19 cortes individuales y sus valores acumulados.

Los datos de la MS fueron estudiados mediante el análisis de la variancia para un nivel de significancia del 5% y para la comparación de medias se utilizó el test LSD, SAS (2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El factor ambiental que condiciona anualmente la producción de forraje de alfalfa, por defecto o por exceso, es la distribución de las precipitaciones. En la **Figura 1** se presentan los valores mensuales (siempre variables) e históricos disponibles en la AER San Cristóbal.

Como la siembra fue el 28-04-10, las lluvias próximas a la misma, facilitaron una buena emergencia de la alfalfa. Posteriormente, los 58 mm de mayo posibilitaron superar los meses de junio, julio y agosto, naturalmente más escasos y con menos evapotranspiración. Setiembre con 50 mm y la alfalfa con el sistema radicular bastante desarrollado se podría asumir que pudo superar la escasez de octubre y noviembre. Diciembre/2010 con 179 mm y enero/2011 con 244 mm superaron al promedio histórico. Luego desde marzo/11 hasta agosto/11 la recepción fue bastante pareja y comienzan las diferencias en setiembre/2011 con 241 mm con un extremo en diciembre/2011 con 17 mm. En la primavera del 2012, las precipitaciones fueron superiores o iguales a la histórica. De este modo se puede continuar la comparación de las precipitaciones hasta febrero de 2013.

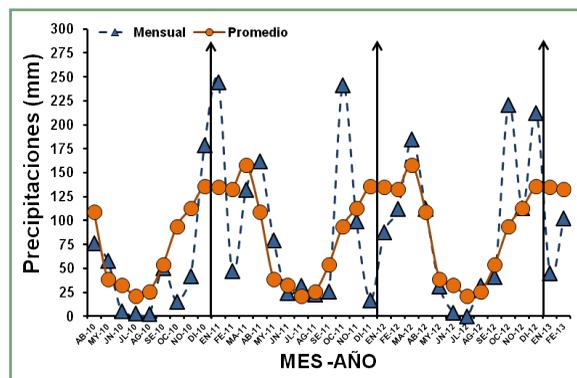


Figura 1. Distribución de precipitaciones en la localidad de San Cristóbal, promedio histórico (círculos, 1960-2013) y mensual (triángulos) ocurridos durante el período de evaluación del ensayo (Abril 2010-Febrero 2013).

Previo al ensayo se tomaron muestras del suelo en todo el perfil hasta 120 cm de profundidad y la descripción y distribución de los componentes químicos se pueden apreciar en las **Figuras 2 y 3**. En la primera se muestran los valores del P en superficie con un promedio de 9.4 mg kg^{-1} , que según la bibliografía son bajos para la producción de alfalfa (Racca et al., 2001; Knudsen y Rehm, 1977). Por lo tanto, la hipótesis de obtener respuestas a la fertilización fosfatada de alfalfa en dicho suelo fue consistente, al menos para los primeros cortes ya que luego de los 60 cm de profundidad la concentración de este índice superó los 25 mg kg^{-1} . Aunque el aumento fue positivo, posiblemente la absorción por las raíces a mayor profundidad podría no ser tan sencilla porque en dichos horizontes existe mayor cantidad de arcilla, que retiene demasiado a los aniones fosfatos.

La denominación de horizontes en la **Figura 2** solo se refiere al perfil de San Cristóbal. Contrastando los datos anteriores se observa otro perfil bien provisto correspondiente a la serie Rafaela, suelo de clase I, profundo y muy productivo para forraje de alfalfa, que en parte se justifica por los altos niveles de Pe, frecuente en el domo

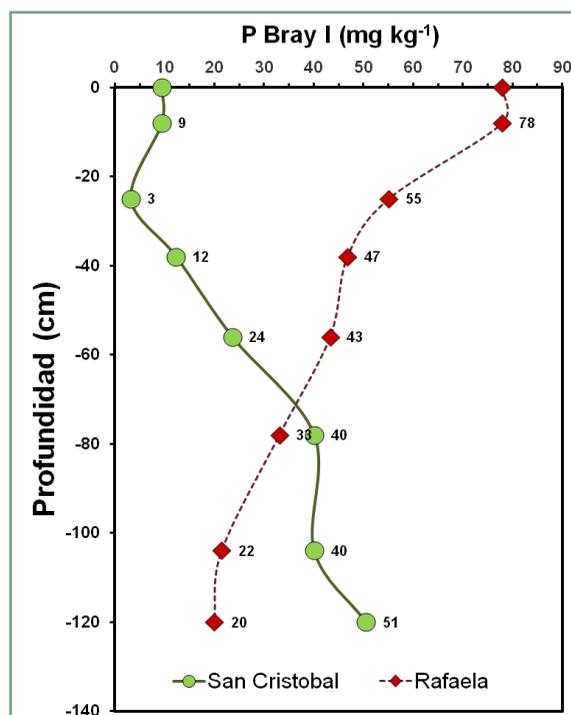


Figura 2. Distribución del Pe (Bray-I) en un suelo de San Cristóbal (círculos) comparado con otro muy bien provisto del domo occidental de la provincia como la Serie Rafaela (diamantes).

occidental de Santa Fe, aunque en los últimos años se registra una gradual disminución por la intensificación productiva.

Otras características químicas como la MO, la CE y el pH del suelo figuran en la **Figura 3**. Es importante el nivel de MO superficial porque a través de su mineralización provee los nutrientes necesarios que demanda la pastura, en este caso P y S.

Dado que el P no es aportado por las lluvias, el mismo debió ser corregido con la fertilización cada vez que sus niveles no se correspondieron con las exigencias de la alfalfa (Culot, 1986). La MO fue suficiente en el horizonte A, pero a partir del horizonte B la misma disminuyó abruptamente lo que posiblemente condicionó la capacidad de intercambio de nutrientes en profundidad, liberando dicha propiedad casi por entero a las arcillas.

Respecto a la CE (mS/cm), los valores estuvieron dentro del rango moderadamente salino (4-8 mS/cm) donde la alfalfa aún es tolerante y no condicionaría su desarrollo. En cambio el pH, si bien fue óptimo en el horizonte A, a partir del horizonte B los valores crecientes de alcalinidad por sobre 8.5 posiblemente hayan afectado la capacidad productiva de la alfalfa, USDA (1996).

Luego del 7° corte, el análisis del suelo reportó los valores de Pe residual indicados en la **Figura 4**. Los únicos tratamientos que superaron los 25 mg kg⁻¹ de P fueron S-P40S40 y G-P40. Por su parte, los tratamientos S-P40 y G-P40S40 registraron incrementos en el nivel de Pe pero no lo suficiente. Tanto los testigos como los tratamientos solo con S oscilaron entre Pe= 12 mg kg⁻¹ y Pe= 14.4 mg kg⁻¹, muy por debajo de lo deseable. Se demostró que el S no tuvo ninguna influencia sobre

los niveles de Pe. En cambio hubo una reacción inmediata cuando se fertilizó con P.

Esta condición determinó que se repitiera la fertilización inicial suponiendo que ocurrirían nuevos incrementos y que los testigos o aquellos solo con S se mantendrían en igual nivel. En la **Tabla 1** se expresan los resultados productivos correspondientes a cada corte.

En todos los cortes no hubo diferencias significativas entre las variedades (p>0.05) ni en la interacción Variedades*Tratamientos de fertilización (p>0.05). Esto indicó que para las alternativas de fertilización tanto Supermonarca INTA-Produsem como GAPP 969+ respondieron en el mismo sentido. El CV tuvo una tendencia a disminuir desde el corte 1 (24.9%) hasta el corte 11 (16%), posteriormente fue variando y en aumento hasta el corte 18 (24%). El análisis acumulado tuvo un CV de 7.2%. Fue importante haber encontrado respuestas significativas al S (p<0.05) respecto al testigo en 11 de los 19 cortes, interpretando que el análisis químico inicial del suelo para S, no pudo diagnosticar la respuesta.

En numerosas experiencias de la región pampeana ocurrieron casos similares y por ello todavía el mejor indicador es la planta. No obstante, existen en nuestro país algunos laboratorios más equipados y con técnicas más precisas que podrían guardar mayor relación con la respuesta.

En la emergencia de plántulas (42 días de la siembra), las parcelas con azufre (S40) se asimilaron a las testigos sin fertilizar. En cambio con P las alfalfas reaccionaron rápidamente, notándose a la vista mayor altura y crecimiento.

Con respecto a P, hubo respuesta significativa

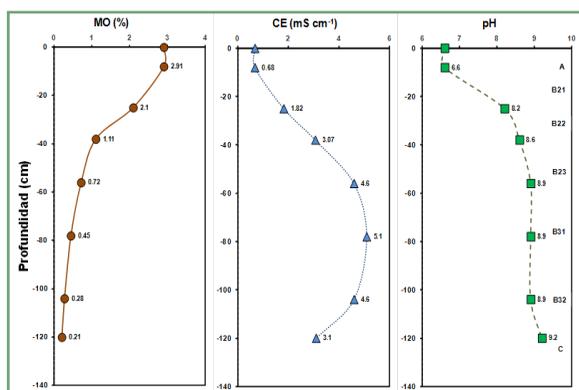


Figura 3. Distribución de la materia orgánica (MO), la conductividad eléctrica (CE) y el pH en un perfil de suelo de San Cristóbal.

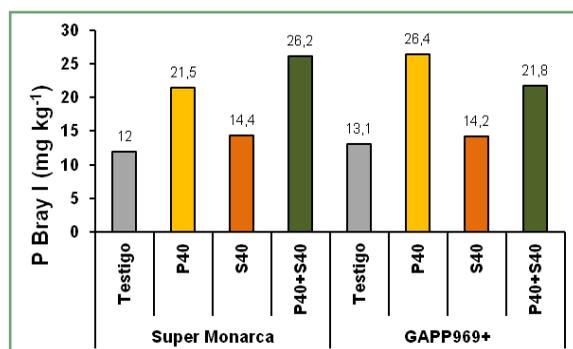


Figura 4. Análisis de P extractable (0-20 cm) realizado después del séptimo corte (13-10-11), promedio para cada tratamiento fertilizado y cada variedad de alfalfa. La "S" inicial o la "G" solo refieren al nombre de la variedad.

Tabla 1. Diferentes cortes de alfalfa, mes y año en que ocurrieron (Corte mes/año), la comparación de los tratamientos fertilizados con P y S (*), el de las variedades, la interacción de la fertilización con las variedades y el coeficiente de variación (CV, %) de cada corte. * C= Cortes Sucesivos. Tratamientos con igual letra no difieren entre sí. LSD al 5%.

CORTES	C 1 (09/10)		C 2 (11/10)		C 3 (12/10)	
Fertilización	Materia Seca (kg ha ⁻¹) e Incrementos Porcentuales.					
Testigo	458 b *	(%)	802 b	(%)	1598 b	(%)
P40	596 ab	138 kg (30)	1226 a	424 kg (53)	2073 a	475 kg (30)
S40	717 a	259 kg (57)	1187 a	385 kg (48)	2078 a	480 kg (30)
P40S40	792 a	334 kg (73)	1511 a	709 kg (88)	2205 a	607 kg (25)
CV	24.9		23.9		18	
CORTES	C 4 (02/11)		C 5 (03/11)		C 6 (04/11)	
Fertilización	Materia Seca (kg ha ⁻¹) e Incrementos Porcentuales.					
Testigo	1637 b *	(%)	1637 b	(%)	1339 c	(%)
P40	2026 a	138 kg (30)	1992 a	96 kg (19)	1653 b	138 kg (30)
S40	2047 a	259 kg (57)	1995 a	217 kg (43)	1680 ab	259 kg (57)
P40S40	2144 a	334 kg (73)	2123 a	291 kg (58)	1909 a	334 kg (73)
CV	9.8		8.4		11	
CORTES	C 7 (10/11)		C 8 (11/11)		C 9 (12/11)	
Fertilización	Materia Seca (kg ha ⁻¹) e Incrementos Porcentuales.					
Testigo	2260 b *	(%)	2387 b	(%)	2083 b	(%)
P40	2690 a	430 kg (19)	2620 a	233 kg (10)	2652 a	569 kg (27)
S40	2475 ab	215 kg (9.5)	2564 ab	177 kg (7.4)	2420 a	337 kg (16)
P40S40	2576 a	316 kg (14)	2525 ab	138 kg (5.8)	2585 a	502 kg (24)
CV	9.4		5.8		8.9	
CORTES	C 10 (01/12)		C 11 (02/12)		C12 (04/12)	
Fertilización	MS (kg ha ⁻¹) e Incrementos Porcentuales.					
Testigo	2314 b *	(%)	1409 b	(%)	1067 a	(%)
P40	2976 a	662 kg (28.6)	1755 a	346 kg (24.6)	1050 a	
S40	2967 a	653 kg (28.2)	1530 ab	121 kg (8.6)	1307 a	240 kg (22.9)
P40S40	3056 a	742 kg (32)	1697 ab	288 kg (20.4)	1324 a	257 kg (24)
CV	11		16		20.3	
CORTES	C 13 (06/12)		C 14 (07/12)		C15 (09/12)	
Fertilización	MS (kg ha ⁻¹) e Incrementos Porcentuales.					
Testigo	787 b *	(%)	305 c	(%)	955 b	(%)
P40	812 ab	25 kg (3.2)	281 c		1162 ab	207 kg (21.7)
S40	972 a	185 kg (23.5)	374 b	69 kg (22.6)	1351 a	396 kg (41.5)
P40S40	992 a	205 kg (26)	449 a	144 kg (47.2)	1414 a	459 kg (48.1)
CV	16.2		12		17	
CORTES	C 16 (10/12)		C 17 (11/12)		C18 (01/13)	
Fertilización	MS (kg ha ⁻¹) e Incrementos Porcentuales.					
Testigo	1691 a *	(%)	1876 a	(%)	1300 b	(%)
P40	1930 a	239 kg (14.1)	1978 a	102 kg (5.4)	1473 ab	173 kg (13.3)
S40	1842 a	151 kg (8.9)	2343 a	467 kg (24.9)	1639 ab	339 kg (26.1)
P40S40	1959 a	268 kg (15.8)	2420 a	544 kg (28.9)	1807 a	507 kg (39)
CV	19		22		24	
CORTES	C 19 (02/13)		(C T)			
Fertilización	MS (kg ha ⁻¹) e Incrementos Porcentuales.					
Testigo	1241 b *	(%)	27 144 c	(%)		
P40	1370 ab	129 kg (10.4)	32 311 b	5167 kg (19)		
S40	1559 ab	318 kg (25.6)	33-046 ab	5902 kg (21.7)		
P40S40	1711 a	470 kg (37.9)	35 198 a	8054 kg (29.7)		
CV	22		7.2			

($p < 0.05$) respecto del testigo en 10 de los 19 cortes. Por último con la combinación P40+S40 la respuesta fue significativa ($p < 0.05$) en 14 de los 19 cortes. En este sentido, es importante tener en cuenta que luego del 7° corte hubo una refertilización. La combinación P x S fue la más importante y los nutrientes actuaron en forma conjunta y aditiva. La influencia positiva del S en forma de yeso agrícola no solo benefició la productividad de la alfalfa sino que dada su movilidad podría disminuir el pH de los horizontes más profundos, siempre que su aplicación no baje la acidez del horizonte A a menos de 5.5 (Figura 5).

Es necesario destacar que el S por sí mismo produjo aumentos de producción y por su bajo costo los productores podrían inclinarse únicamente hacia él. No es lo correcto porque la deficiencia de P continúa existiendo y de esa manera se acentuará. En consecuencia la mayor producción de forraje solo con S también extrajo P, pero en este caso totalmente del suelo y no del fertilizante. Si la decisión es solamente usar S el camino elegido es equivocado y no sustentable, porque la continua extracción de P sin el aplicación correspondiente de fertilizante provocará una continua degradación. En la Figura 4 se observa como los tratamientos con P mantienen niveles más adecuados de Pe además de mejorar la productividad de la alfalfa. Por ello se deberían utilizar ambos nutrientes P y S a la vez, cuyos resultados han demostrado la mayor significación y ser económicamente viables, **Tabla 1 y Figura 5**.

El tratamiento P40S40 difiere del tratamiento

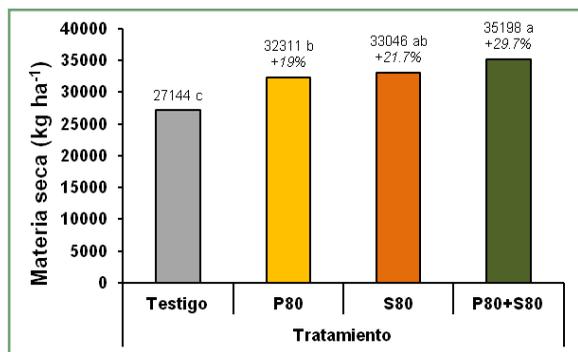


Figura 5. Producción de materia seca de 19 cortes promedio para dos variedades de alfalfa (Supermarca-INTA-Produsem y GAPP 969+) con iguales tratamientos de fertilización de fósforo (P), azufre (S) y su combinación (P*S). La fertilización fue en dosis dividida entre siembra y séptimo corte. Medias con distinta letra difieren entre sí, LSD al 5%. Localidad de San Cristóbal, 2010-2013.

P40 y el Testigo y los tratamientos S40 y P40 difieren del testigo según la prueba del LSD (Figura 5).

La producción de MS de alfalfa mediante doble aplicación de 40 unidades de P= P40 produjo 32 311 kg ha⁻¹ de MS, con doble aplicación de 40 unidades de S= S40 fue de 33 046 kg ha⁻¹ de MS y con la combinación doble P40S40 alcanzó 35 198 kg ha⁻¹ de MS. Los porcentajes de aumento correspondientes fueron de 19%, 21.7% y 29.7% respecto al testigo sin fertilizar, con 27 144 kg ha⁻¹ de MS y los incrementos correspondientes fueron de 5167 kg ha⁻¹, 5902 kg ha⁻¹ y 8054 kg ha⁻¹, respectivamente, (Figura 5).

Fue evidente el aumento que incluyó la doble aplicación de fertilizantes. La relación P y S ya fue caracterizada en otros ensayos conducidos por Vivas (2005) y por Vivas et al. (2007) en estudios con alfalfa y secuencias agrícolas. Como la movilidad de los SO₄²⁻ se la puede asimilar a la de los nitratos (Havlin et al. 1999), es importante destacar lo mencionado por Chao et al. (1962) quienes particularizaron las estructuras químicas de los dos aniones, fosfatos y sulfatos, que permitieron a los PO₄⁻ liberar a los SO₄²⁻ adsorbidos en las arcillas y aumentar el disponible para la planta. Posteriormente, Hoefft et al. (1973) constataron en laboratorio la capacidad del P en solución como extractante del S.

Dado la ausencia de diferencias significativas entre las variedades y la no interacción significativa variedades*tratamientos fertilizados ($p > 0.05$), a continuación se puede observar la evolución de los cortes conjuntos de las variedades a través de todos los tratamientos (Figura 6).

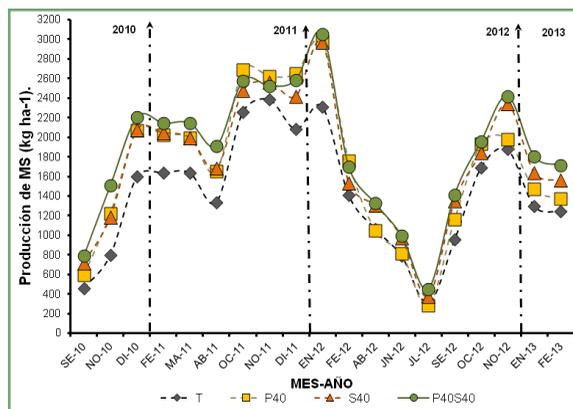


Figura 6. Evolución de la producción de materia seca (MS) a través de los cortes sucesivos. Valores promedio de las dos variedades de alfalfa a través de los tratamientos con doble fertilización: T (testigo ♦), P (fósforo ■), S (azufre ▲) y fósforo + azufre (P+S ●). Localidad de San Cristóbal, 2010-2013.

Todos los tratamientos fertilizados produjeron más forraje de alfalfa que el testigo. El T comenzó produciendo un promedio de 458 kg ha⁻¹ de MS y finalizó con 1241 kg ha⁻¹ de MS, Su máximo ocurrió el 11/2011 con 2386 kg ha⁻¹ de MS. La combinación P*S que resultó la más productiva y se inició con 792 kg ha⁻¹ de MS y finalizó con 1711 kg ha⁻¹ de MS. Su máximo sucedió durante 01/2012 con 3056 kg ha⁻¹ de MS.

Interpretación Económica

Se puede observar en la **Tabla 2** la producción de MS de los 19 cortes y los nutrientes expresados como doble fertilización (P80, S80 y P80+S80), los costos de cada tratamiento, lo disponible para diferentes porcentajes de aprovechamiento, los litros de leche producidos y los beneficios económicos de cada tratamiento respecto al testigo, con su respectivo valor porcentual.

El tratamiento testigo siempre produjo menos que cualquier otro fertilizado y el incremento económico total debido al mayor porcentaje de aprovechamiento también fue evidente (**Tabla 2**). Para el Testigo los beneficios económicos crecientes según el 60 %, 65 % o 70 % de aprovechamiento fueron 59 438 \$ ha⁻¹, 64 666 \$ ha⁻¹ y 69 894 \$ ha⁻¹, respectivamente. Los beneficios económicos de

los tratamientos con P, S o P+S respecto a su correspondiente testigo oscilaron desde 9937 \$ ha⁻¹ (16.7 %) para una eficiencia de cosecha del 60% hasta un aumento de 18 986 \$ ha⁻¹ (27.2 %) si se alcanza el 70% de aprovechamiento.

CONCLUSIONES

- ❖ Las variedades Supermonarca INTA-Produsem y GAPP 969+ respondieron de forma similar y significativa a la fertilización con P, S y P+S.
- ❖ El análisis del P extractable fue conducente para el diagnóstico pero no así el S. Para el caso, la alfalfa fue el mejor indicador.
- ❖ La respuesta al factor P fue significativa en 10 ocasiones, la del S en 11 y la combinación P+S en 14 de los 19 cortes, lo cual demostró la importancia de la fertilización conjunta P+S para alcanzar mayor producción de forraje y a su vez mantener mejor la fertilidad del suelo.
- ❖ El incremento de MS con P fue de 5167 kg ha⁻¹ (19%), con S de 5902 kg ha⁻¹ (21.7%) y con la combinación P+S de 8054 kg ha⁻¹ (29.7%) por sobre el testigo sin fertilizar.
- ❖ Hubo aumentos crecientes de forraje en función del porcentaje de aprovechamiento, que en nuestro estudio contempló un máximo de 70%, pero que otros productores más tecnificados podrían aumentarlo y hacer más eficiente la

Tabla 2. Producción de Materia Seca, gastos variables según tratamiento de fertilización, aprovechamiento según varios criterios, litros de leche producidos, beneficio económico como margen obtenido en cada estrategia y margen adicional respecto al testigo. Nota: para los cálculos económicos se consideró el fertilizante superfosfato triple de calcio como fuente de P= US\$ 580 t⁻¹ y yeso agrícola como fuente de S = US\$ 210 t⁻¹; el precio del litro de Leche = \$ 3.21; y una tasa de cambio de US\$ 1 = \$ 8.64. Valores al mes de Enero 2015. Se utilizó una equivalencia de 1 kg MS de alfalfa (en dieta equilibrada) = 1.2 litros de leche.

Fertilización	MS Total. (kg ha ⁻¹)	Gastos (\$ ha ⁻¹)	Aprovechamiento (%)			Litros de Leche			
			60	65	70	60	65	70	
			MS (kg ha ⁻¹)			(l ha ⁻¹)			
Testigo	27 144	3297	16 286	17 644	19 001	19 544	21 172	22 801	
P80	32 311	5302	19 387	21 002	22 618	23 264	25 203	27 141	
S80	33 046	4023	19 828	21 480	23 132	23 793	25 776	27 759	
P80+S80	35 198	6028	21 119	22 879	24 639	25 343	27 454	29 566	
	Margen	Margen adicional sobre Testigo							
Aprovecha- miento (%)	60	65	70	60	65	70			
	\$ ha ⁻¹			\$ ha ⁻¹	%	\$ ha ⁻¹	%	\$ ha ⁻¹	%
Testigo	59 438	64 666	69 894	-	-	-	-	-	-
P80	69 375	75 598	81 821	9937	16.7	10 932	16.9	11 927	17.1
S80	72 353	78 728	85 082	12 915	21.7	14 051	21.7	15 188	21.7
P80+S80	75 322	82 101	88 880	15 883	26.7	17 435	27	18 986	27.2

tecnología de fertilización.

- ❖ Decidir utilizar la tecnología de fertilización implica la responsabilidad de ser eficiente en el porcentaje de aprovechamiento. En esta experiencia, según el porcentaje de utilización del forraje, los beneficios económicos del P, S y el P+S respecto de su correspondiente testigo oscilaron de 9937 \$ ha⁻¹ (17.1%) para el P con aprovechamiento del 60%, hasta 18 986 \$ ha⁻¹ (27.2%) para la combinación P+S con el 70 % de aprovechamiento.
- ❖ Como el sitio estudiado participa de un área con suelos acomplejados y es intermedio entre el domo oriental (deficiente en P y en S) y el occidental (suficiente por ahora en ambos nutrientes), se recomienda el uso del análisis de suelo en forma periódica, tanto para mejorar las recomendaciones de fertilización como para monitorear los efectos del manejo de nutrientes.
- ❖ Los resultados aquí obtenidos no necesariamente se comportarán de igual modo en todos los lotes, por lo que el análisis de suelos de cada caso es fundamental.
- ❖ El área de San Cristóbal, Santa Fe, tiene posibilidades de aumentar la producción de forraje de alfalfa a través de mayores estudios con los nutrientes P, S y sus combinaciones.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los Srs. Roberto, Claudio y Jorge Manganeli propietarios del campo donde se llevó a cabo el estudio y al Sr. Cleomar Tomatis, auxiliar técnico de la EEA INTA Rafaela, quien fue el encargado de realizar los cortes. Al igual que a técnicos de la AER San Cristóbal por el cuidado del ensayo.

BIBLIOGRAFÍA

- Chao, T.T., M.E. Harward, y S.C. Fang.** 1962. Movement of 35S tagged sulfate through soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 26:27-32.
- Barrow, N.J.** 1975. Chemical form of inorganic phosphate in sheep feces. *Aust. J. Soil Res.* 13:63-67.
- Culot, J.P.** 1986. Nutrición mineral y fertilización en el ambiente de la región pampeana. En: *Investigación, Tecnología y Producción de Alfalfa*. Colección científica del INTA. pp. 81-117.
- Darwich, N.** 1983. Niveles de P disponible en suelos pampeanos. *IDIA.* 409-412: 1-5. INTA Buenos Aires, Argentina
- García, F.O.** 2001. Balance de fósforo en los suelos de la región pampeana. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur.* N° 9. INPOFOS. Potash and Phosphate Institute of Canada.
- Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale, y W.L. Nelson.** 1999. *Soil Fertility and Fertilizers. An Introduction to Nutrient Management.* Sulfur, Calcium and Magnesium. Chapter 7. p 217-244.
- Hijano, E.H. y D.H. Basigalup.** 1995. El cultivo de la alfalfa en la República Argentina. En. *La Alfalfa en la Argentina.* INTA. Subprograma Alfalfa. 282 p.
- Hoef, R.G., L.M. Walsh, y D.R. Keeney.** 1973. Evaluation of varios extractants for available soil sulfur. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37:401-404.
- Knudsen, D. and G. Rehm.** 1977. *Fertilizer Management for Alfalfa.* NebGuide G 73-2. Cooperative Extension Service. Institute of Agriculture and Natural Resources, University of Nebraska. Lincoln.
- Lanyon, L.E. and W.K. Griffith.** 1988. Nutrition and Fertilizer Use. In. *Alfalfa and Alfalfa improvement.* ASA-CSSA-SSA, Madison, Wisconsin. Agronomy Monograph 29. 333-372.
- Ozanne, P.G.** 1980. Phosphate Nutrition of Plants. A General Treatise. Chapter 20. In. *The Role of Phosphorus in Agriculture.* Ed. Khasawneh, F. E.; Sample, E. C. and Kamprath, E. J. ASA-CSSA-SSA. Madison, WI.
- Racca, R., D. Collino, J. Dardanelli, D. Basigalup, N. González, E. Brenzoni, N. Hein y M. Balzarini.** 2001. Contribución de la fijación biológica de nitrógeno a la nutrición nitrogenada de la alfalfa en la región pampeana. Proyecto Nacional PRONALFA. Ediciones INTA. 56 p.
- Russelle, M.P.** 2001. Alfalfa. After 8,000-year journey, the "Queen of Forages" stands poised to enjoy renewed popularity. *American Scientist* (89) 252-261.
- Salvagiotti, F., G. Ferraris, A. Quiroga, M. Barraco, H. Vivas, P. Prystupa, H. Echeverría y F.H. Gutiérrez Boem.** 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.
- SAS Institute Inc.** 2004. SAS OnlineDoc® 9.1.3. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Spencer, K.** 1975. Sulphur requirements of plants. p. 98-116. In. K. D. McLachlan (ed.) *Sulphur in Australasian agriculture.* Sydney University Press, Sydney.
- USDA.** 1996. *Soil Survey Laboratory methods manual.* Soil Survey Investigation Report N° 42. Version 3.0. Washington DC, USA. 693p.
- Vivas, H.S.** 1995. Fertilización de pasturas base alfalfa en la región central de Santa Fe. *Información Técnica Para Productores.* INTA EEA Rafaela.
- Vivas, H.S. y M.S. Guaita.** 1997 a. Respuesta a la fertilización fosfatada de alfalfa en un año caracterizado por estrés hídrico. *Temas de Producción Lechera.* SAPyA, INTA, Centro Regional Santa Fe, EEA Rafaela. Publicación Miscelánea N° 84. p 16-19.
- Vivas, H.S. y M.S. Guaita.** 1997 b. Alfalfa Yield Response to Applied P in the Central Area of Santa Fe Province, Argentina. Poster N°139. Div. S-4. *Soil Fertility and Plant*

Nutrition. Los Angeles, Anaheim Convention Center. USA. Exhibit Hall C, First Floor. 89 th Annual Meeting, Anaheim, California. Octubre 26-30, 1997.

Vivas, H.S. y O. Quaino. 2000. Fósforo y enmienda cálcica para la producción de alfalfa en dos suelos del centro este de Santa Fe. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata.

Vivas, H.S.; J.C. Alesso y O. Quaino. 2001. Producción de alfalfa fertilizada con fósforo y azufre en el centro este de Santa Fe. 24° Congreso Argentino de Producción Animal (AAPA). Rafaela, 19 al 21 de setiembre de 2001.

Vivas, H.S. y L. Romero. 2004. Fósforo y azufre en la producción de alfalfa en el centro de Santa Fe. Planteos Ganaderos en Siembra Directa. Revista de la Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa (AAPRESID). p 58-61.

Vivas, H.S. 2005. Fósforo, Azufre y estrategias de fertilización para incrementar la materia seca de Alfalfa. En. XXI Curso Internacional de Lechería para Profesionales de América Latina. Temas claves para una producción de leche bovina eficiente y de calidad. Ediciones INTA. p 80-91.

Vivas, H.S., R. Albrecht, A. Oliveira Ferreira y J. L. Hotián. 2007. Fertilización compuesta (N-P-S) de trigo en una rotación. Respuesta productiva y desarrollo radicular. INTA EEA Información Técnica de trigo y otros cultivos de invierno. Campaña 2007. Publicación Miscelánea N° 107. p 68-77. ■

[volver al índice](#)

Respuesta de la colza a la aplicación de N, S y B en el centro sur bonaerense

Martín Zamora^{1,*}, Cristian Appella¹, y Guillermo Pugliese²

¹Chacra Experimental Integrada Barrow (INTA-MAA); ²Bunge Argentina SA.

*Contacto: zamora.martin@inta.gob.ar; CC 50. Tres Arroyos, Buenos Aires

INTRODUCCIÓN

La nutrición es uno de los factores más importantes que afectan el crecimiento y el rendimiento del cultivo de colza, en especial la disponibilidad de nitrógeno (N) y azufre (S) (Zhao et al., 1993). Bajo siembra directa, la mineralización de la materia orgánica es menor que en labranza convencional y al permitir una intensificación de la agricultura (más de un cultivo por año), es posible que los suelos empiecen a manifestar deficiencias de nutrientes que hasta ahora no se habían presentado como es el caso del S. Esto se agrava más con la incorporación de cultivos con altas necesidades de S como es el caso de la colza (Grant y Bailey, 1993). Por otra parte, al fertilizar colza con altas dosis de N, es necesario incrementar adecuadamente los niveles de S para un óptimo rendimiento de granos, haciendo un suministro constante de S fácilmente disponible desde la emergencia hasta la elongación de la vara floral (Malhi y Leach, 2002).

Una alta disponibilidad de N previo al comienzo de senescencia de las hojas podría determinar mayor área foliar y duración de la misma garantizando una mayor provisión de asimilados, lo que se traduciría en el logro de mayor número de silicuas y semillas por silicuas (Dreccer et al., 2000; Justes et al., 2000). El número de granos es el componente que más explica los cambios en el rendimiento en colza (Peltonen-Saino y Jauhainen, 2008; Scarisbrick et al., 1981), y es más sensible que el peso del grano a cambios en la disponibilidad de nitrógeno (Ogunlela et al., 1990; Hocking y Mason, 1993). Los efectos del S sobre los componentes numéricos del rendimiento han sido mucho menos estudiados, observándose pocos efectos significativos sobre el peso y número de granos (Asare y Scarisbrick, 1995).

El boro (B) es un micronutriente que en ocasiones limita el rendimiento del cultivo. En la planta, el B está acomplejado con compuestos orgánicos en las paredes celulares, aparentemente con función estructural no específica. Una de las primeras respuestas de las plantas a la deficiencia de B es el acortamiento de la raíz, sin embargo, hay una

falta de comprensión de cómo se produce este. La deficiencia de boro también restringe el crecimiento del tubo polínico. Esta es la razón por lo que la demanda de B es mayor durante la etapa reproductiva. El boro también afecta la fertilización y la viabilidad del polen. Desafortunadamente, los métodos de análisis de suelo actuales no predicen consistentemente respuestas económicas a los fertilizantes B en colza.

Tanto Bergh (2000) y Ventimiglia (2001) trabajando bajo labranza convencional en Tres Arroyos y 9 de julio (Bs. As) respectivamente, y Agosti (2011) en laboratorio, indican incrementos de rendimientos en el cultivo de colza a medida que incrementa la dosis de N. En cambio en estos mismos trabajos no se observaron respuestas a la fertilización azufrada, ya que la disponibilidad inicial de este elemento en el suelo y la liberación a la solución del suelo durante el ciclo del cultivo, fue suficiente para los rendimientos obtenidos (Bergh et al., 2000; Ventimiglia et al., 2001).

Para nuestro territorio se ha evidenciado escasa respuestas a la fertilización con B (Ferraris et al., 2013), o en muchos casos citados en la literatura internacional la respuesta es negativa por efecto de la toxicidad originada por el pH del suelo o la alta dosis de B empleada.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la respuesta a la fertilización con N, S y B en colza en el área centro sur bonaerense.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios Experimentales

Se establecieron tres ensayos, uno por campaña agrícola (2012/13, 2013/14 y 2014/15). En todos los casos los ensayos fueron implantados sobre el mismo suelo, un Paleudol petrocálcico, serie Tres Arroyos. Previo a la siembra se realizó un muestreo de suelo en cada sitio para determinar contenido de materia orgánica (MO), fósforo extractable (P Bray 1), pH, N como nitrato (N-NO_3^-), S como sulfato (S-SO_4^{2-}) y B. En la **Tabla 1** se muestran las principales características químicas de los suelos en los sitios experimentales.

Tabla 1. Caracterización química del suelo en cada uno de los experimentos.

ANÁLISIS	PROF. (cm)	CAMPAÑA		
		2012/13	2013/14	2014/15
P extractable (mg kg ⁻¹)	0-20	50.4	18.6	20.8
MO (%)	0-20	2.7	3.8	3.7
pH	0-20	6.0	6.1	6.2
N-NO ₃ ⁻ (kg ha ⁻¹)	0-60	61	24	34.6
S-SO ₄ ⁻² (mg kg ⁻¹)	0-20	4.1	4.8	4.5
	20-40	3.8	4.5	4.2
B	0-20	0.74	0.8	1

Diseño experimental y tratamientos

Se utilizó un diseño en bloques completos aleatorizados con 4 repeticiones. Los tratamientos realizados durante las campañas 2012/13 y 2013/14 en cada uno de los ensayos fueron los siguientes:

- T1- TESTIGO (Sin N-Sin S).
- T2- 40 kg N ha⁻¹
- T3- 40 kg N ha⁻¹ + 20 kg S ha⁻¹
- T4- 40 kg N ha⁻¹ N + 20 kg S ha⁻¹ + 0.125 kg S ha⁻¹
- T5- 80 kg N ha⁻¹
- T6- 80 kg N ha⁻¹ + 20 kg S ha⁻¹
- T7- 80 kg N ha⁻¹ + 20 kg S ha⁻¹ + 0.125 kg B ha⁻¹
- T8- 120 kg N ha⁻¹
- T9- 120 kg N ha⁻¹ + 20 kg S ha⁻¹
- T10- 120 kg N ha⁻¹ N + 20 kg S ha⁻¹ + 0.125 kg B ha⁻¹
- T11- 160 kg N ha⁻¹ N
- T12- 160 kg N ha⁻¹ N + 20 kg S ha⁻¹
- T13- 160 kg N ha⁻¹ N + 20 kg S ha⁻¹ de S + 0.125 kg B ha⁻¹

En la última campaña (2014/15) además de los tratamientos mencionados se agregaron dos que consistían en dividir la dosis de N en los tratamientos de 120 N y 160 N (tratamientos 10 y 13), totalizando 15 tratamientos. La aplicación dividida fue 80 N al momento de roseta y el complemento para llegar al objetivo (40 y 80 N, respectivamente) durante el inicio de la elongación de la vara floral.

Se aplicó UAN como fuente nitrogenada y tiosulfato de amonio, como fuente azufrada. Tanto la fuente nitrogenada como la azufrada se aplicaron al suelo, en el momento de roseta con mochila. El B fue aplicado en forma foliar al momento de elongación. Se determinó rendimiento de granos.

Análisis estadístico

Los datos fueron analizados utilizando el procedimiento proc mixed del programa SAS (SAS Institute, Inc., 2001) para determinar efectos de interacción entre los tratamientos de fertilización y las campañas. Posteriormente, se realizó un ANOVA para determinar efectos de los diferentes tratamientos de fertilización y la prueba DMS (p<0.05) para la separación de medias entre tratamientos.

Manejo de los cultivos

En la **Tabla 2** se indica el manejo de los cultivos en las tres campañas.

Tabla 2. Manejo de los cultivos en cada uno de los sitios para 2012/13, 2013/14 y 2014/15.

Características	2012/13	2013/14	2014/15
Tipo de labranza	Directa	Directa	Directa
Profundidad de suelo	1 m	1 m	1 m
Cultivo antecesor	Maíz Silaje	Maíz Silaje	Cebada
Fecha de siembra	25/05/12	20/05/13	30/05/14
Fertilización a siembra	120 MAP	120 MAP	120 MAP
Cultivar	Rivette	Rivette	Nuvette 2286

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efectos climáticos sobre el cultivo

En todas las campañas las precipitaciones acumuladas entre los meses de marzo y abril fueron suficientes para la recarga del perfil edáfico y asegurar una perfecta implantación del cultivo, no obstante durante el mes de mayo, en la campaña 2012, se contabilizó un total de 103,7 mm lo que pudo originar algún problema de anegamiento y posterior muerte de plántulas (**Figura 1**). Durante los estados de floración-llenado de grano, críticos para el cultivo, se acumularon alrededor de 198 mm para las campañas 2012 y 2013, mientras que fueron 331 mm para la 2014, evidenciándose en esta última efecto de lavado de nitratos. Respecto al ciclo total del cultivo, se evidenció

una acumulación de precipitaciones de 761 mm en la campaña 2014, 530 mm en la 2012 y 316 mm en la 2013; sin embargo esta última mostró la mejor distribución de lluvias en el estado crítico del cultivo.

Efecto de los tratamientos sobre el rendimiento

La interacción entre tratamientos y campañas resultó ser altamente significativa ($p < 0.0001$), y para un mejor abordaje las comparaciones se muestran separadamente las tres campañas. En todas las campañas se evidenció diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos de fertilización (Tablas 3, 4 y 5).

Campaña 2012/13

Los rendimientos obtenidos por las diferentes dosis de fertilización nitrogenada fueron superiores al testigo sin N. Las respuestas observadas al incrementar las dosis de N, en todos los casos resultaron en un aumento de rendimiento, con la excepción de las observadas entre las dosis de 40 y 80N. La eficiencia en el uso del N del fertilizante varió entre 6.5 y 4.8 kg de grano kg N aplicado⁻¹. No se evidenciaron diferencias significativas tanto por el agregado de S como de B, para una misma dosis de N.

Tabla 3. Rendimiento de colza para los diferentes tratamientos de fertilización. Campaña 2012/13. Chacra Barrow.

TRATAMIENTOS	REND (kg/ha)
1- TESTIGO (Sin N-Sin S).	1986 e
2- 40 kg N ha ⁻¹	2247 d
3- 40 kg N ha ⁻¹ + 20 kg S ha ⁻¹	2302 d
4- 40 kg N ha ⁻¹ + 20 kg S ha ⁻¹ + 0.125 kg B ha ⁻¹	2290 d
5- 80 kg N ha ⁻¹	2368 cd
6- 80 kg N ha ⁻¹ + 20 kg S ha ⁻¹	2393 cd
7- 80 kg N ha ⁻¹ + kg S ha ⁻¹ + 0.125 kg B ha ⁻¹	2496 bc
8- 120 kg N ha ⁻¹	2549 b
9- 120 kg N ha ⁻¹ + 20 kg S ha ⁻¹	2562 b
10- 120 kg N ha ⁻¹ + 20 kg S ha ⁻¹ + 0.125 kg B ha ⁻¹	2607 b
11- 160 kg N ha ⁻¹	2792 a
12- 160 kg N ha ⁻¹ + 20 kg S ha ⁻¹	2867 a
13- 160 kg N ha ⁻¹ + 20 kg S ha ⁻¹ + 0.125 kg B ha ⁻¹	2930 a
Promedio	2492
Anova (p)	<0.0001
CV (%)	4.30
DMS	153.8

Campaña 2013/14

Los rendimientos obtenidos por las diferentes dosis de fertilización nitrogenada fueron superiores al testigo sin N. Las respuestas observadas al incrementar las dosis de N, en todos los casos resultaron en un aumento de rendimiento. La eficiencia en el uso del N del fertilizante varió entre 13.3 y 14.6 kg de grano kg N aplicado⁻¹. Solo se observó respuesta significativa al agregado de S para la dosis de 120 N. No obstante para las demás dosis de N, la tendencia al incremento de rendimiento por el agregado de S fue similar aunque no significativa. No se evidenciaron efectos por el agregado de B.

Tabla 4. Rendimiento de colza para los diferentes tratamientos de fertilización. Campaña 2013/14. Chacra Barrow.

TRATAMIENTOS	REND (kg/ha)
T1- TESTIGO (Sin N-Sin S).	1882 g
T2- 40 kg N ha ⁻¹	2420 f
T3- 40 kg N ha ⁻¹ + 20 kg S ha ⁻¹	2505 f
T4- 40 kg N ha ⁻¹ + 20 kg S ha ⁻¹ + 0.125 kg B ha ⁻¹	2592 f
T5- 80 kg N ha ⁻¹	3005 e
T6- 80 kg N ha ⁻¹ + 20 kg S ha ⁻¹	3131 de
T7- 80 kg N ha ⁻¹ + kg S ha ⁻¹ + 0.125 kg B ha ⁻¹	3259 de
T8- 120 kg N ha ⁻¹	3484 d
T9- 120 kg N ha ⁻¹ + 20 kg S ha ⁻¹	3775 c
T10- 120 kg N ha ⁻¹ + 20 kg S ha ⁻¹ + 0.125 kg B ha ⁻¹	3917 bc
T11- 160 kg N ha ⁻¹	4221 ab
T12- 160 kg N ha ⁻¹ + 20 kg S ha ⁻¹	4376 a
T13- 160 kg N ha ⁻¹ + 20 kg S ha ⁻¹ + 0.125 kg B ha ⁻¹	4416 a
Promedio	3306
Anova (p)	<0.0001
CV (%)	7.93
DMS	374.4

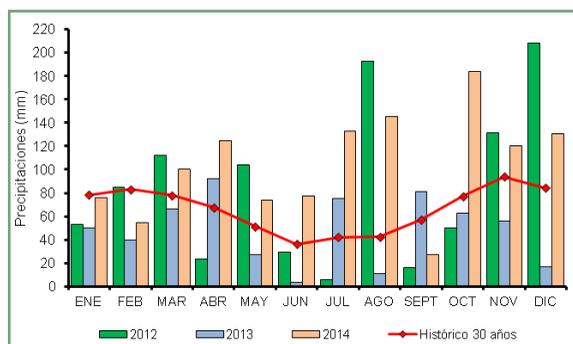


Figura 1. Precipitaciones mensuales durante 2012, 2013, 2014 y media histórica en Barrow.

Campaña 2014/15

Los rendimientos obtenidos por las diferentes dosis de fertilización nitrogenada fueron superiores al testigo sin N. Las respuestas observadas al incrementar las dosis de N, en todos los casos resultaron en un aumento de rendimiento. La eficiencia en el uso del N del fertilizante varió entre 9.2 y 13 kg de grano kg N aplicado⁻¹. Luego de la aplicación de N en estado de roseta, se registró una lluvia de 140 mm, que hicieron que el N como nitrato fuera transportado más allá del metro de profundidad (datos no presentados en este trabajo). No obstante, es probable que las raíces de la colza hayan alcanzado parte de los mismos, ya que no se encontró un efecto significativo de los tratamientos en que la dosis de N fue dividida entre los estado de roseta y elongación de la vara floral (tratamientos 11 y 15). Solo se observó respuesta significativa al agregado de S para la dosis de 40 N. No obstante para las demás dosis de N, la tendencia al incremento de rendimiento por el agregado de S fue similar aunque no significativa. No se evidenciaron efectos significativos sobre el rendimiento, por el agregado de B.

Análisis entre campañas

La campaña 2013/14 fue superior a la 2012/13 y 2014/15 tanto en rendimientos absolutos como en respuestas, aunque en todas las campañas los rendimientos testigos fueron similares. La eficiencia de uso del nitrógeno fertilizante se redujo al aumentar la disponibilidad de N, tal como lo representa la ley de los rendimientos decrecientes tanto en colza-canola (Dreccer et al., 2000; Hocking et al., 1997) como en trigo (Timsina et al., 2001; Doyle y Holford, 1993).

Tal eficiencia, durante las campañas analizadas, se encontró dentro de rangos ya informados con anterioridad para este cultivo y esta región (Zamora y Massigoge, 2008). Sin embargo las eficiencias logradas en la campaña 2013/14 fueron superiores a las del 2014/15 y duplicaron a las del 2012/13.

Las diferencias tanto en respuesta al N como así también en las eficiencias logradas entre campañas posiblemente fueron debidas a las precipitaciones ocurridas durante dos periodos. El primero, luego de la siembra durante el mes de mayo, con el suelo a capacidad de campo y con posteriores lluvias superiores a 100 mm que lavaron el N disponible. El segundo durante el mes de agosto y luego de las aplicaciones de N se sucedieron lluvias superiores a 180 mm que

Tabla 5. Rendimiento de colza para los diferentes tratamientos de fertilización. Campaña 2014/15. Chacra Barrow.

TRATAMIENTOS	RENDIMIENTO (kg ha ⁻¹)	
T1- TESTIGO (Sin N-Sin S).	1873	l
T2- Dosis 1 de N como UAN	2241	k
T3- Dosis 1 de N como UAN + 20 kg S ha ⁻¹ de S	2530	j
T4- Dosis 1 de N como UAN + 20 kg S ha ⁻¹ + 0.125 kg B ha ⁻¹	2650	ij
T5- Dosis 2 de N como UAN	2910	hi
T6- Dosis 2 de N como UAN + 20 kg S ha ⁻¹	3029	gh
T7- Dosis 2 de N como UAN + 20 kg S ha ⁻¹ + 0.125 kg B ha ⁻¹	3166	fgh
T8- Dosis 3 de N como UAN	3299	efg
T9- Dosis 3 de N como UAN + 20 kg S ha ⁻¹	3357	def
T10- Dosis 3 de N como UAN + 20 kg S ha ⁻¹ + 0.125 kg B ha ⁻¹	3470	cde
T11- Dosis 3 de N dividida como UAN + 20 kg S ha ⁻¹ + 0.125 kg B ha ⁻¹	3622	bcd
T12- Dosis 4 de N como UAN	3618	bcd
T13- Dosis 4 de N como UAN + 20 kg S ha ⁻¹	3742	abc
T14- Dosis 4 de N como UAN + 20 kg S ha ⁻¹ + 0.125 kg B ha ⁻¹	3813	ab
T15- Dosis 4 de N dividida como UAN + 20 kg S ha ⁻¹ + 0.125 kg B ha ⁻¹	4012	a
Promedio	3156	
Anova (p)	<0.0001	
CV (%)	6.25	
DMS	281.4	

lavarón el mismo hacia lugares no accesibles a las raíces. Además de una mejor distribución de las mismas en la campaña 2013/14.

Respecto al S, en particular para la campaña 2013/14, era de esperar, por los bajos niveles de S inicial y altos rendimientos, una respuesta superior al agregado del mismo, que solo se evidenció en el tratamiento de 120 N.

Las escasas respuestas observadas para el agregado de B, en las tres campañas, pudo deberse a que el suelo se encontraba dentro del rango de suficiencia moderada para este elemento (INTA, 2000). Resultados similares fueron informados por Ferraris et al. (2013) para la zona N de Bs As.

En la **Figura 2** se muestran los rendimientos promedio de las tres campañas para las dosis crecientes de N. La eficiencia promedio para las tres campañas fue de 10 kg de grano por cada kg de fertilizante agregado, independientemente de la dosis aplicada.

En la **Figura 3** se muestran los resultados promedio de los tratamientos con y sin S para las tres campañas, como así también los rendimientos promedio de los tratamientos con y sin B.

CONCLUSIÓN

Se encontraron respuestas al agregado de diferentes dosis de N en las tres campañas. Los incrementos de rendimiento fueron de 13, 19, 28 y 40 % superiores al testigo para la campaña 2012/13, de 28, 59, 85 y 124 % para la 2013/14 y 19, 55, 76 y 93 % para la 2014/15, para las dosis de 40, 80, 120 y 160 kg N ha⁻¹ respectivamente.

Solo se observó respuesta al agregado de S en la campaña 2013/14 para la dosis de 120 N y en

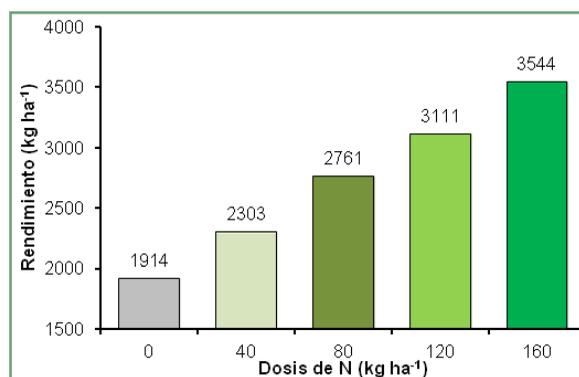


Figura 2. Rendimiento de la colza para las diferentes dosis de N, promedio de las campañas 2012/13, 2013/14 y 2014/15. Chacra Barrow.

la campaña 2014/15 para la dosis de 40 N.

No se detectaron respuestas positivas a la fertilización con B en ninguna de las campañas analizadas debidas a que el suelo presentó valores de suficiencia moderada para el cultivo.

BIBLIOGRAFÍA

Agosti, M. B. 2011. Fertilización nitrógeno-azufrada y variabilidad genotípica en el rendimiento y calidad de grano en colza-canola (*Brassica napus* L.). Tesis para optar por el grado de Magister. Facultad de Ciencias Agrarias. UBA. 130pp.

Asare, E., y D.H. Scarisbrick. 1995. Rate of nitrogen and sulphur fertilizers on yield, yield components and seed quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Field Crops Research* 44: 41-46.

Bergh, R, M. Zamora y A. Jensen. 2000. Fertilización de colza bajo siembra directa. En: II Jornada Regional de SD, Chacra Experimental Int. Barrow (Convenio MAA-INTA). 5 pp.

Dreccer, M.F., A.H.M. Schapendonk, G.A. Slafer y R. Rabbinge. 2000. Comparative response of wheat and oilseed rape to nitrogen supply: absorption and utilization efficiency of radiation and nitrogen during the reproductive stage determining yield. *Plant and Soil* 220: 189-205.

Ferraris, G., L. Couretot y J. Urrutia. 2013. Respuesta del cultivo de colza a N, S y B en dos espaciamientos y su impacto residual en soja de segunda. Campaña 2012/13. INTA Pergamino. 6pp.

Grant, C.A., y L.D. Bailey. 1993. Fertility management in canola production. *Canadian Journal of Plant Science* 73 (3): 651-670.

Hocking, P.J., y L. Mason. 1993. Accumulation, distribution and redistribution of dry matter and mineral nutrients in fruits of canola (oilseed rape), and the effects of nitrogen fertilizer and windrowing. *Australian Journal of Agricultural Research* 44: 1377-1388.

Justes, E., P. Denoroy, B. Gabrielle, y G. Gosse. 2000. Effect of crop nitrogen status and temperature on the radiation use efficiency of winter oilseed rape. *European*

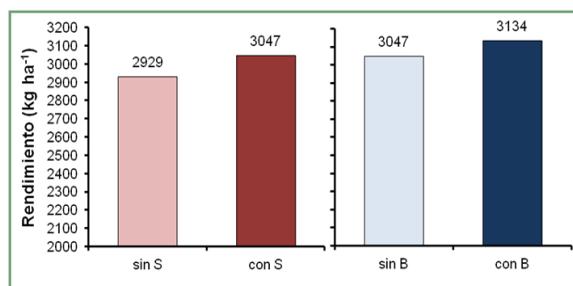


Figura 3. Rendimiento de colza con y sin agregado de S y B. Promedio de las campañas 2012/13, 2013/14 y 2014/15. Chacra Barrow.

Journal of Agronomy 13: 165-177.

Malhi, S.S., y D. Leach. 2002. Optimizing yield and quality of canola seed with balanced fertilization in the parkland zone of Western Canada. In: Acts 17th WCSS. Thailand, 14-21 august.

Ogunlela, V.B., A. Kullmann, y G. Geisler. 1990. Nitrogen distribution and dry matter accumulation in oilseed rape (*Brassica napus* L.) as influenced by N nutrition. Journal of Agronomy and Crop Science 164: 321-333.

Peltonen-Sainio, P., y L. Jauhiainen. 2008. Association of growth dynamics, yield components and seed quality in long-term trials covering rapeseed cultivation history at high latitudes. Field Crops Research 108: 101-108.

Scarisbrick, D., R. Daniels, y M. M. Alcock. 1981. The effects of sowing date on the yield and yield components of spring oilseed rape. Journal Agricultural Science, Cambridge 97: 189-195.

Timsina, T., U. Singh, M. Badaruddin, C. Meisner, y M.R. Amin. 2001. Cultivar, nitrogen, and water effects on productivity, and nitrogen-use efficiency and balance for rice-wheat sequences of Bangladesh. Field Crop Research 72, 143-161.

Ventimiglia, L. 2001. Colza: Como responde al agregado de N y S. Forrajes y granos. 62:138-139.

Zhao, F.J., E.J. Evans, P.E. Bilsborrow, y J.K. Syers. 1993. Influence of sulphur and nitrogen on seed yield and quality of low glucosinolate oilseed rape (*Brassica napus* L.). Journal of the Science of Food and Agriculture 63: 29-37.

Zamora, M., y J. Massigoge. 2008. Fertilización de colza: respuesta a la aplicación de N y S en el centro sur bonaerense. En: Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Potrero de los Funes, San Luis. 13-16 mayo. ■

[volver al índice](#)

Simposio Fertilidad 2015 : nutriendo los suelos para las generaciones del futuro /
Adrian Alejandro Correndo ... [et.al.] ; coordinado por Fernando Oscar
García y Adrian Alejandro Correndo. - 1a ed. - Acassuso : International
Plant Nutrition Institute, 2015.
E-Book.

ISBN 978-987-24977-6-7

1. Fertilidad. 2. Suelos. 3. Cultivos. I. Correndo, Adrian Alejandro II. Fernando Oscar García,
coord. III. Correndo, Adrian Alejandro, coord.
CDD 631.5

Fecha de catalogación: 07/05/2015

Editado por:
Fernando O. Garcia y Adrian A. Correndo

Este libro no podrá ser reproducido, ni total ni parcialmente, sin el previo permiso de los editores.

1ra edición Mayo 2015

Diseño:
Agroeditorial, Alejandro Matthiess - info@agroeditorial.com.ar

Editado en Argentina

