

Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica

IAH 12 - Diciembre 2013

Avances en políticas de manejo y conservación de suelos en Uruguay	2
Manejo nutricional para alta productividad de cultivos e impacto ambiental reducido	7
Producción forrajera con aplicación otoñal de fertilizantes nitrogenados en avena y en agropiro	15
Fertilización en sorgo en el norte y centro-oeste de Buenos Aires. Rendimiento y eficiencia comparada al maíz	19
Desarrollo de un índice de productividad de suelo regional a través de una red neuronal artificial	23
Reporte de Investigación Reciente	27
Cursos y Simposios	28
Publicaciones Disponibles	29



Editores : **Dr. Fernando O. García**
Dr. Raúl Jaramillo
Dr. Armando Tasistro

International Plant Nutrition Institute (IPNI)

Se permite copiar, citar o reimprimir los artículos de este boletín siempre y cuando no se altere el contenido y se citen la fuente y el autor.

<http://www.ipni.net>

En este número

- Políticas de manejo y conservación de suelos en Uruguay
- Manejo nutricional e impacto ambiental
- Producción forrajera en avena y agropiro
- Fertilización en sorgo
- Índice de productividad de suelo

Oficina para el Cono Sur de Latinoamérica • Av. Santa Fe 910 (B1641ABO) Acassuso • Buenos Aires - Argentina
Telf/Fax.: 54 11 4798 9939 • Correo electrónico: Lpisauri@ipni.net • <http://Lacs.ipni.net>

Oficina para el Norte de Latinoamérica • Casilla Postal 17 17 980 • Quito - Ecuador
Telf.: 593 2 2463 175 • Fax: 593 2 2464 104 • Correo electrónico: aormaza@ipni.net • <http://nla.ipni.net>

Oficina para México y Centroamérica • 3500 Parkway Lane, Suite 550 • Norcross, GA 30092 - EE.UU
Telf.: 1 770 825 8079 • Fax: 1 770 448 0439 • Correo electrónico: atasistro@ipni.net • <http://mca.ipni.net>

Avances en políticas de manejo y conservación de suelos en Uruguay

Mariana Hill¹ y Carlos Clérics²

Introducción

Uruguay atraviesa un proceso de expansión e intensificación agrícola. La producción total de granos se cuadruplicó en los últimos 15 años, periodo en el cual se duplicó la productividad y se expandió la actividad hacia nuevas áreas, ampliando la frontera agrícola. Esta expansión ha sido, en muchos casos, hacia suelos cuya capacidad de uso no es adecuada para soportar agricultura intensiva.

La economía uruguaya está en pleno proceso de transformación estructural, incrementando la apertura externa, que lleva a un aumento del perfil de especialización agro-industrial, e intensivo en el uso de recursos naturales. Esta coyuntura, por demás favorable, aporta una gran oportunidad a la actividad agrícola y agropecuaria con foco en las cadenas agroexportadoras, lo que define en parte las estrategias adoptadas por el Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca (MGAP) en el sentido de: i) Profundizar el desarrollo agroexportador, incluyendo a sectores de la agricultura familiar; ii) desarrollar políticas para el uso sostenible de los recursos naturales (RRNN) y la adaptación al cambio climático; iii) fortalecer el vínculo con el sector privado, que tiene un papel clave en inversión, innovación, capacitación de recursos humanos y desarrollo de mercados; iv) inserción internacional; y v) desarrollo de sistemas de información como bienes públicos.

Si bien esta es una excelente oportunidad para el desarrollo del sector agro-exportador, resulta indispensable realizar un uso y manejo responsable del suelo para minimizar los procesos de degradación y erosión, y mantener la sostenibilidad productiva en el largo plazo.

Mediante el presente artículo se pretende dar cuenta de las actividades que se llevan a cabo en Uruguay desde 2010, en relación a la aplicación del marco legal vigente en materia de manejo y conservación de suelos, orientada a controlar el principal problema ambiental que tiene el país, fuera de las áreas urbanas, la erosión de suelos, tanto por la pérdida de productividad del recurso como por ser fuente principal de contaminación difusa de los cuerpos de agua.

Marco legal

Desde el MGAP, junto con otros Ministerios, se está trabajando en torno a estas grandes prioridades estratégicas. La Dirección General de Recursos Naturales Renovables (RENARE) ha puesto particular énfasis en la Conservación de Suelos bajo el marco de la Ley de Conservación de Suelos y Aguas del Uruguay (Ley No. 15.239), existente desde

1981 y reglamentada inicialmente en 1990, que ampara las acciones que se están llevando a cabo en este sentido y que fue modificada en 2004 (Decreto No. 333), y posteriormente se incorporaron modificaciones en 2008 (Decreto No. 405).

En el artículo 1º de la Ley No. 15.239 se declara: “de interés nacional promover y regular el uso y la conservación de los suelos y de las aguas superficiales destinadas a fines agropecuarios. Se asigna al Estado, el deber de velar por prevenir y controlar la erosión y degradación de los suelos, las inundaciones y la sedimentación en cursos de agua y en los lagos y lagunas naturales y artificiales”, entre otras.

En el año 2009 se aprueba la Ley No. 18.564 en la que se establece, entre otros aspectos, que los tenedores de tierras a cualquier título, quedan obligados a aplicar las técnicas que señale el MGAP y en todos los casos será solidariamente responsable el propietario del predio (consultar en www.renare.gub.uy).

Además de fiscalizar el cumplimiento de las normas técnicas, se comenzó a implementar la aplicación del Artículo 5º del Decreto reglamentario No. 405/2008 que establece que el MGAP, exigirá la presentación de un Plan de Uso y Manejo Responsable del Suelo, en el cual deberá exponerse que el sistema de producción proyectado determine una erosión tolerable, teniendo en cuenta los suelos del predio, la secuencia de cultivos y las prácticas de manejo.

Antecedentes

La RENARE, Dirección del MGAP encargada de las políticas de Suelos y Aguas, llevó a cabo reuniones con la comunidad científica y tomó la opción de utilizar la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE en su sigla en inglés) (Wischmeier y Smith, 1960) y su versión revisada (RUSLE) (Renard et al., 1991), para validar los planes de uso del suelo presentados, utilizando el programa Erosión 6.0 (García Préchac et al., 2009). Desde fines de la década del setenta, el país, a través de diferentes instituciones nacionales (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Facultad de Agronomía-Universidad de la República y el Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca) desarrolló su ajuste y validación para su uso en las condiciones nacionales de manera confiable. Se está, en definitiva, capitalizando la inversión en investigación en estos temas que el país realizó en los últimos 40 años (Durán y García Préchac, 2007).

Para el cumplimiento de la normativa, el equipo del RENARE-MGAP trabajó a lo largo de casi tres años en el

¹ Autor de contacto: Dirección General de Recursos Naturales Renovables (MGAP) Av. Garzón 456 Montevideo: Correo electrónico: mhill@mgap.gub.uy

² Dirección de división de Suelos y Aguas (MGAP).

desarrollo de los instrumentos y las herramientas para su implementación. La premisa básica consistió en una construcción colectiva con los sectores involucrados. En ese marco se definieron las siguientes pautas:

- Las herramientas que se aplican (como por ejemplo la USLE, **Ecuación 1**), se basan en conocimiento científico desarrollado por las instituciones competentes. Como el conocimiento no se agota, y menos en estos tiempos, siempre que haya desafíos tecnológicos, habrá nuevos desarrollos de tecnología. De esto surge que el vínculo con el INIA, la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República (FAGRO-UDELAR) y generadores de tecnología, es permanente.
- La profesión privada es protagonista. Nada de esto es posible si el agrónomo no hace suya la responsabilidad del cuidado de los recursos, hoy quienes se forman en manejo de suelos son los profesionales de la Agronomía. Hoy se está implementando en conjunto con la Asociación de Ingenieros Agrónomos del Uruguay y la FAGRO-UDELAR, un sistema de acreditación de técnicos privados para la elaboración y presentación de los planes de uso.
- La “construcción colectiva” debe potenciar el vínculo público–privado que busque identificar y capitalizar las sinergias que existen en áreas de tecnología, conocimiento, recursos humanos, entre otras áreas.

Adaptación y validación del modelo en Uruguay

El decreto reglamentario, como se indicó, establece el criterio de erosión tolerable para validar los planes de uso del suelo presentados. Esto implica definiciones tales como estimar erosión y definir las tolerancias para los suelos del país.

Ecuación universal de pérdida de suelo (USLE):

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (1)$$

donde:

- A: es la pérdida de suelo por unidad de superficie. Se expresa en $Mg \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.
- R: es el Factor Erosividad de la Lluvia ($J \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), que pondera la energía cinética de la lluvia, que expresa en definitiva la capacidad de la lluvia de producir erosión.
- K: es el Factor Erodabilidad del Suelo (susceptibilidad a sufrir erosión), expresada como la cantidad promedio de suelo perdido por unidad del Factor R (con la simplificación propuesta por Troeh et al., 1999; $Mg \text{ J}^{-1}$).
- L, S, C, y P: son factores estándares y no tienen dimensiones:
 - L: es el Factor Longitud de la Pendiente. Es la relación entre la erosión con una longitud de pendiente dada y la que ocurre en el estándar de 22.1 m de longitud, a igualdad de los demás factores.
 - S: es el Factor Inclinación de la Pendiente. Es la

relación entre la erosión con una inclinación de pendiente dada y la que ocurre en el estándar de 9% de inclinación, a igualdad de los demás factores.

- C: es el Factor Uso y Manejo. Es la relación entre la erosión de un suelo con un determinado sistema de uso y manejo y la que ocurre en el mismo suelo puesto en las condiciones estándar en que se definió el Factor K, a igualdad de los demás factores.
- P: es el Factor Práctica Mecánica de Apoyo. Es la relación entre la erosión que ocurre con una determinada práctica mecánica de apoyo y la que ocurre con la condición estándar de laboreo a favor de la pendiente, a igualdad de los demás factores.

Como todo desarrollo, la herramienta refleja el conocimiento actual y la hace adecuada para la planificación del uso del suelo a escala predial, generando *a priori* la estimación de pérdida de suelo por erosión que se generaría de implementar el uso y manejo propuesto, y así seleccionar el que asegure la sostenibilidad del recurso. El programa Erosión 6.0 es un programa de computación basado en dicho modelo, con información generada para su aplicación en las condiciones nacionales.

El modelo USLE/RUSLE estima tasas de erosión para combinaciones de localidad - suelo - topografía - uso y manejo. Su primera versión fue publicada en 1960 (Wischmeier y Smith, 1960) y se mantuvo una línea de trabajo que culminó con la publicación de la versión revisada y actualizada del modelo, llamada RUSLE (Renard et al., 1997), que ha tenido gran éxito y se ha convertido en la herramienta técnica oficial utilizada en el contralor legal de la erosión en los Estados Unidos.

Desde principios de los ochenta hasta la fecha se han realizado avances para adaptar y validar el modelo en Uruguay y la región sur de la Cuenca del Plata (García Préchac, 1992; García Préchac et al., 1997 y 1999; Clérico y García Préchac, 2001). En el esfuerzo inicial (1979 a 1986) participaron la Dirección de Suelos (DS), la División Uso y Manejo del Agua del MGAP (DUMA), la EE La Estanzuela del Centro de Investigaciones Agrícolas Alberto Boerger (EELÉ–CIAAB, actual INIA) y la FAGRO-UDELAR.

Con el apoyo de IICA - OEA, la DUMA obtuvo información nacional sobre el Factor R, Erosividad de las Lluvias, del modelo (Rovira et al., 1982; Pannone et al., 1983). En la actualidad se posee información que cubre todo el territorio nacional, las provincias de Corrientes, Entre Ríos, Santa Fe, Córdoba y Buenos Aires de Argentina, y el Estado de Río Grande do Sul de Brasil, compilada en un mapa de isoerodentas (García Préchac et al., 1999; Clérico y García Préchac, 2001).

La DS obtuvo información nacional sobre el factor K, de erodabilidad de los suelos (Puentes, 1981). El factor C resultó en una primera etapa de seleccionar de la bibliografía internacional valores de sistemas de uso y manejo comparables (aunque nunca totalmente) a los

de nuestro país (Puentes, 1981; García y Baetghen, 1982; García, 1982; Puentes y Szogi, 1983). Posteriormente, se generaron valores para los principales sistemas de producción del Uruguay, con sus variantes de manejo de suelos, se ha publicado una síntesis de la mayoría de los resultados obtenidos (García Préchac et al., 1997; Durán y García Préchac, 2007) y se ha elaborado un programa de computación actualizado que contiene la información disponible sobre todos los factores y las rutinas de cálculo, para facilitar su aplicación por los usuarios (García Préchac et al., 2009). Este programa es el que se aplicará para cumplir con los planes de uso y manejo a presentar por las empresas.

La nueva cartografía

Se ha identificado que en muchos casos, sino en todos, es necesario contar con cartografía a escalas prediales para obtener los parámetros que se necesitan para usar el modelo. Por otro lado, más allá de esta reglamentación de la ley, la planificación del uso del suelo a nivel predial requiere indefectiblemente un buen inventario del recurso suelo del predio. A su vez es claro que la cartografía actual, disponible para todo el país (Cartografía de la Comisión Nacional de Estudio Agronómico de la Tierra, CONEAT) es insuficiente para realizar la planificación de uso del suelo a nivel de predio, dado que fue realizada con otros fines.

La RENARE está desarrollando una nueva cartografía a escala 1:40 000 para todo el país, que se espera genere entre otros, una mejor herramienta de planificación de uso del suelo para los técnicos, empresas y productores. La unidad taxonómica será la SERIE y las unidades cartográficas serán series o asociaciones de series. Esto se está discutiendo con la Sociedad Uruguaya de Ciencia del Suelo (SUCS) y se espera el aporte de todos los técnicos capacitados en el tema para que puedan, además de su aporte a este desarrollo, pasar el acervo de conocimiento a nuevas generaciones en formación.

Etapa piloto de planes de uso

En septiembre de 2010 se inició una etapa piloto, en la que empresas agrícolas, a través de sus técnicos, participaron en forma voluntaria en la presentación de planes de uso. El

objetivo fue ajustar y validar las herramientas propuestas en situaciones reales y en conjunto con el sector privado, antes de pasar a la fase obligatoria. La mencionada Etapa Piloto culminó en mayo de 2013 y fue posteriormente evaluada con los técnicos y empresas participantes.

A su vez, se realizaron más de 100 talleres de capacitación del uso de las herramientas por parte de la Dirección y equipo técnico de RENARE así como numerosos cursos por parte de la Facultad de Agronomía.

En la mencionada etapa piloto se presentaron planes en 29 000 ha, 2% del área agrícola del país, lo que permitió el ajuste y validación de la metodología propuesta conjuntamente con el sector productivo, tanto empresas como técnicos. Se valoró como muy positivo el apoyo recibido por dicho sector y también se comprobó que muchas empresas y técnicos conscientes del tema ya estaban trabajando en sentido de lograr la sostenibilidad de la producción. Paralelamente se desarrolló un registro de técnicos ante el MGAP que habilitó a casi 900 ingenieros agrónomos para presentar los planes en la fase obligatoria. Este registro permite, tener un contacto directo con los profesionales que presentan planes, lo que facilita la comunicación y el contacto en caso de ser necesario.

El 70% del área de planes piloto presentados correspondieron a rotaciones de cultivos anuales, y se ubicaron en la zona de suelos de mejor capacidad de uso del país y en el casi 99% de los casos las rotaciones debieron incluir gramíneas de verano (**Tabla 1**) demostrando que tanto la rotación trigo/soja como el monocultivo de soja no son viables considerando la erosión hídrica estimada. En el 30% restante del área, básicamente en zonas tradicionalmente no agrícolas de menor capacidad de uso, las rotaciones presentadas incluyeron pasturas perennes con diferentes largos de las fases agrícolas y pastoriles (datos no mostrados). Esto indica que es muy difícil lograr, agricultura sostenible en áreas más marginales si esta no se realiza en rotación con pasturas.

La rotación 1, implica suelo sin cultivo en un invierno, práctica no deseada en materia de conservación del suelo, pero al ser rastrojo de sorgo (o maíz), en suelos de alta

Tabla 1. Ejemplos de algunas rotaciones agrícolas puras presentadas en la etapa piloto y su superficie relativa.

Rotación	Superficie relativa (%)	Verano		Invierno		Verano		Invierno	
		Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno
1	45.1	Soja 1 ^{ra}	Trigo	Maíz/sorgo	Barbecho	-	-	-	-
2	43.1	Soja 2 ^{da}	Trigo	Maíz/sorgo 2 ^{da}	Trigo	-	-	-	-
3	4.4	Soja 1 ^{ra}	Trigo	Soja 2 ^{da}	Cobertura	-	-	-	-
4	3.0	Soja 1 ^{ra}	Trigo	Maíz/sorgo	Cobertura	-	-	-	-
5	2.7	Soja 1 ^{ra}	Trigo	Soja 2 ^{da}	Cobertura	Maíz	Barbecho	-	-
6	1.3	Soja 1 ^{ra}	Trigo	Soja 2 ^{da}	Barbecho	-	-	-	-
7	0.4	Soja 2 ^{da}	Trigo	-	-	-	-	-	-

productividad, se logra una buena cobertura por residuos lo que da a lugar a erosiones estimadas por debajo de los umbrales de tolerancia. Para el caso de la rotación 2, si bien plantea un doble cultivo anual con presencia de gramíneas de verano alternando con soja, es probable que no se pueda realizar todos los años ya que los tiempos para realizar los trabajos en tiempo y forma son reducidos. Solo el 4.4% del área de agricultura pura, pudo obtener un resultado positivo para la rotación 3 debido a que es un sistema que resulta de alto riesgo de erosión para los suelos del país por su susceptibilidad intrínseca y pendientes asociadas. Estos resultados surgen del uso de un modelo y dependen de los parámetros agronómicos que se ingresen al mismo. Queda en evidencia, por tanto, la responsabilidad de los profesionales en el uso responsable del modelo.

FASE 1. Obligatoria para cultivos de invierno: trigo y cebada 2013

Planes presentados

En esta primera etapa 286 técnicos presentaron planes.

Se realizó la recepción de planes que culminó el 31 de mayo de 2013. Se definió una gradualidad en tamaño de chacras a presentar en las sucesivas etapas. En la **Tabla 2** se presenta el total de planes presentados y su área respectiva declarada.

Dicha superficie es concordante con las zafras anteriores de trigo y cebada de 450 000 ha en 2011 y 550 000 ha para 2012, mostrando un elevado porcentaje de presentación. Respecto al área de intención de siembra estimada por DIEA en septiembre 2013 (MGAP, 2013) y considerando unas 10 000 ha no obligatorias por tamaño de chacra, el nivel de presentación o de cumplimiento estimado es 98% del área de cultivos de invierno.

No se cuenta aún con la información procesada para documentar los sistemas presentados, el porcentaje de suelos del país aptos para agricultura continua, y el porcentaje que debería volver al sistema de rotación con pasturas.

Estrategia de control

Luego del cierre de la recepción de planes existen 3 actividades a realizar, tanto en esta etapa, así como en las sucesivas del proceso en general:

- Identificación de omisos. Una de las claves más importantes del éxito de esta política es poder realizar una buena fiscalización de su cumplimiento, de modo que a esto se le está dando mucha importancia. Se están utilizando imágenes satelitales que permiten contrastar una aproximación de la realidad con las

áreas con planes presentados. Con un control de campo se va definiendo el listado de posibles omisos para la etapa de aplicación de sanciones. En vista al excelente nivel de presentación logrado, la etapa de detección de omisos no es una tarea sencilla, lo que a todas luces, es una situación por demás deseable.

- Análisis de los planes presentados. En el caso de los planes presentados, se están evaluando aspectos formales y técnicos. En función de las observaciones, luego de realizadas seis reuniones grupales de devolución a los técnicos que presentaron planes en diferentes puntos del país, se está en la etapa de contacto individual con los técnicos para analizar cada situación cuando corresponda. Es importante el hecho de que los profesionales están registrados lo que favorece y facilita el vínculo desde el Ministerio con los mismos. Se está procesando la información sobre los planes presentados. Una vez realizada, permitirá la planificación a nivel del país desde las necesidades de semillas hasta intensidad de uso en una determinada cuenca.
- La Fiscalización de cumplimiento de planes se realizará cuando el proceso esté en plena vigencia.

FASE 2. Obligatoria para cultivos de verano

Desde el 2 de septiembre al 22 de noviembre de 2013 se establece la fase obligatoria 2, en la que entran los cultivos de verano. En este caso se trata del área de verano “de primera” ya que los cultivos de segunda ya fueron declarados junto al área de trigo y cebada. Se prevé para esta etapa un entorno de un millón y medio de hectáreas entre cultivos de primera y segunda. Con la información más reciente, al 11 de noviembre de 2013, se han presentado 682 000 ha de cultivos de primera que junto a las aproximadamente 450 000 de cultivos de segunda serían 1 132 000 ha, equivalente a 75% del área a ser sembrada.

Acciones a futuro

En esta etapa de intercambio con el sector productivo se ha detectado la falta de mayores instancias de comunicación y de capacitación. Para ello se está trabajando en el desarrollo de herramientas educativas en modalidades semi-presenciales, de manera de facilitar mecanismos a destinatarios y a centros de educación como la FAGRO-UDELAR.

Complementariamente, se están realizando ajustes al programa Erosión 6.0 en aspectos informáticos y agronómicos. Para ello se ha creado un Comité Técnico con INIA y FAGRO para canalizar las necesidades de generar información para potenciar la herramienta en aspectos técnicos. Está planteado el desarrollo de convenios con el sector público y privado para profundizar la investigación y el desarrollo en las áreas identificadas como necesarias (por ejemplo: cartografía digital, modelos de carbono y nitrógeno, Guía de Buenas Prácticas Agrícolas, etc.).

Uno de los puntos más importantes, es la necesidad en la

Tabla 2. Planes presentados área trigo y cebada 2013.

No. planes de uso	3845
Área efectiva (ha)	522 144

capacitación/acreditación de técnicos. Para ello se están realizando reuniones con la Asociación de Ingenieros Agrónomos (AIA).

Tanto en el tema de cartografía como en el de planes de uso, se está trabajando con el apoyo de la SUCS y se espera, desde el MGAP, contar con el apoyo de los referentes del tema, como se apuntó anteriormente.

Para el desarrollo de estas acciones se cuenta con fondos previstos en el Proyecto "Manejo Sostenible de los Recursos Naturales y Adaptación al Cambio Climático" con apoyo del Banco Mundial y el Fondo de Adaptación. Tanto el desarrollo de las herramientas de aplicación, como las de capacitación y fiscalización, está previsto que sean desarrolladas con fondos de este Proyecto.

Consideraciones finales

El grado de cumplimiento a nivel del sector solo se puede alcanzar cuando todos los actores están comprometidos. Se destaca el compromiso e involucramiento de todos (productores, técnicos, empresarios, etc.) como clave para haber logrado los resultados actuales.

La herramienta y la metodología utilizadas se adaptaron bien a los objetivos planteados. El hecho de contar con un programa de uso amigable, con la información ajustada y validada para el país, facilitó la parte operativa.

En la mayoría de los suelos del país, la agricultura sería viable solo en rotación con pasturas lo que conduciría a un nuevo diseño de la producción agrícola que no necesariamente conduce a una disminución del área sino a su vinculación con la ganadería, ya que implica la inclusión de especies estivales anuales como maíz y sorgo (suplementación estratégica), así como praderas perennes.

Existen otras normas técnicas cuyo cumplimiento es imprescindible, para acompañar y complementar a los planes de uso en el logro del objetivo de conservación del suelo y esto se viene fiscalizando con mayor regularidad e intensidad desde el año 2008.

La aplicación del decreto No. 405/2008 busca promover la planificación del uso del suelo a nivel de predio, de manera de lograr sistemas de producción sostenibles, basado en el concepto básico en conservación de suelos, para que cada suelo sea usado de acuerdo a su capacidad.

Finalmente, se destaca como altamente positiva la "construcción colectiva", el vínculo público-privado que busque identificar y la capitalización las sinergias que existen en áreas de tecnologías, conocimiento y recursos humanos.

Bibliografía

Clérici, C., y F. García Préchac. 2001. Aplicaciones del modelo USLE/RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región sur de la cuenca del Río de la Plata. *Agrociencia*. (Revista Científica de la Facultad de Agronomía - UDELAR). Montevideo, Uruguay. 5(1):92- 103.

Durán, A., y F. García Préchac. 2007. Suelos del Uruguay. Génesis y Clasificación. Uso y Manejo. ED. Hem Sur.

García Préchac, F. 1982. Predicción de pérdidas de suelo por erosión hídrica. Facultad de Agronomía, Universidad de la República O. del Uruguay, Depto. de suelos, 57 p.

García Préchac, F. 1992. Conservación de suelos. Serie Técnica No. 26 INIA, Uruguay 63 p.

García Préchac, F., C. Clérici, M. Hill, y I.T. Focus. 2009. EROSION 6.0. Software basado en USLE/RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión para Uruguay y el sur de la cuenca del Plata. Disponible en <http://www.fagro.edu.uy>

García Préchac, F., C. Clérici, y J.A. Terra. 1999. Avances con USLE-RUSLE para estimar erosión y pérdidas de productividad en Uruguay. In 14º Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Pucón, Chile, 835 p.

García Préchac, F., C. Clérici, y V. Denis. 1997. Actualización de la información para el uso del modelo USLE-RUSLE en Uruguay, pp. 1-10, In F. García Préchac (Ed.) Curso de Actualización Técnica sobre Siembra Directa y Conservación de Suelos, FA(UDELAR), U. de Ed. Perm., Cód. No. 438.

García Préchac, F., y W. Baethgen. 1982. Utilización de la información disponible en conservación de suelos y aguas. *Anales del congreso de ingeniería agronómica 1982*, inédito.

MGAP. 2013. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la República Oriental del Uruguay. www.mgap.gub.uy,

Pannone, J.C., F. García, y L.A. Rovira. 1983. Índice de Erosividad de las Lluvias en el Uruguay. (Factor R de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo), MAP - INC - IICA, Montevideo, Uruguay, 36 p.

Puentes, R. 1981. A framework for the use of the Universal Soil Loss Equation in Uruguay, M.Sci. Thesis, Texas A & M University. 80 p.

Puentes, R., y A. Szogi. 1983. Manual para la Utilización de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo en Uruguay. Serie: Normas Técnicas en Conservación de suelos. No. 1, DS - MAP, Montevideo, Uruguay, 80 p.

Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. Mc Cool, y D.C. Yonder. 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), United State Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Agriculture Handbook Number 703.

Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, y J.R. Porter. 1991. RUSLE: Revised universal soil loss equation. *JSWC* 46(1): 30-33.

Rovira, L.A., W. Corsi, F. García, y R. Hofstadter. 1982. Erosividad de lluvias en las zonas e influencia de las estaciones agroclimáticas La Estanzuela, Paysandú, Bella Unión y Treinta y Tres. MAP - INC - IICA, Montevideo, Uruguay, 16 p.

Troeh, F. R., J. A. Hobbs, y R. L. Donahue. 1999. Soil and Water Conservation. Englewood Cliffs (NJ): Prentice Hall. EE.UU.

Wischmeier, W.H., y D.D. Smith. 1960. A Universal Soil Loss Ecuation To Guide Conservation Farm Planning. In. 7th International Congress of Soil Science, Madison., U.S.A: 418-425. 🌱

Manejo nutricional para alta productividad de cultivos e impacto ambiental reducido*

Antonio P. Mallarino¹

Introducción

El manejo responsable de los nutrientes de las plantas es muy importante debido a la volatilidad de las relaciones de precios grano: fertilizante y la preocupación pública acerca del deterioro de la calidad de agua debido al exceso de pérdida de nutrientes desde los campos. Las fluctuaciones impredecibles de los precios de granos y de fertilizantes, y las regulaciones reales o percibidas de los gobiernos, complican las decisiones de fertilización. Sin embargo, el público desinformado y muchos agentes reguladores del gobierno ven la reducción de las dosis de fertilizante como una forma efectiva de disminuir la pérdida de nutrientes desde los campos y el deterioro de la calidad del agua, especialmente cuando se aplican abonos de origen animal. Reducir las dosis de aplicación de nutrientes a través de todas las condiciones no es una buena decisión de manejo, esto puede reducir los ingresos económicos de los productores y no necesariamente reducir la pérdida de nutrientes de los campos de manera significativa.

Los conceptos básicos más relevantes del manejo de nutrientes para incrementar la eficacia en la producción de cultivos, sin aumentar o inclusive reduciendo el deterioro de la calidad del agua, son diferentes para los nutrientes de alta movilidad en el suelo como el nitrógeno (N, principalmente en la forma de nitratos - NO_3^-) y los de baja movilidad como fósforo (P) y potasio (K). Este artículo se enfoca en las consideraciones para los nutrientes menos móviles, discutiendo principalmente el caso del P, ya que las pérdidas de K no resultan en problemas de calidad de agua. La eutrofización de fuentes de agua dulce debido a excesos de P es un serio inconveniente en países desarrollados y en algunas áreas de países en desarrollo. Por lo tanto, los productores y consultores agrícolas deberían conocer los conceptos fundamentales del uso de los análisis de suelo y las prácticas de aplicación, y necesitan entender que no hay una sola mejor forma de interpretar los valores de análisis de suelos y decidir dosis de aplicación de nutrientes. Los organismos encargados de regular el manejo de nutrientes también deberían comprender la importancia de reglas flexibles ya que no existe una sola mejor práctica de manejo de nutrientes.

El análisis de suelos: una herramienta de diagnóstico útil pero imperfecta

El análisis de suelos para P y K es una herramienta útil para el diagnóstico y debería ser utilizada para decidir las dosis de fertilización. Comparado con los altos precios

de los cultivos y fertilizantes durante la última década, el muestreo y análisis de suelos se han convertido en una de las prácticas menos costosas y de uso más justificado. Las metodologías de análisis de suelos intentan medir una cantidad de nutriente que es proporcional a la cantidad disponible para los cultivos, y la cantidad medida podría diferir entre suelos con propiedades contrastantes. Además, los distintos análisis para un nutriente suelen proveer diferentes resultados que pueden expresarse en una variedad de formas. Por lo tanto, los métodos de análisis de suelos necesitan ser calibrados para utilizarse en una región específica. Los procesos de calibración incluyen determinar el nivel o rango que separa los suelos con alta y baja o nula probabilidad de respuesta (nivel o rango crítico) y la dosis de fertilización apropiada para cada valor o rango (Dahnke y Olson, 1990). La mayoría de los países y los estados de EE.UU. establecen categorías que abarcan desde niveles muy bajos a muy altos o excesivos. Determinar el nivel o rango crítico no es un proceso claro y preciso, y pueden utilizarse una gran variedad de ecuaciones matemáticas para determinarlos. Todas las ecuaciones incluyen un sesgo y un significativo nivel de incertidumbre, y los cálculos se pueden orientar a lograr máximos rendimientos o máximos retornos económicos. Niveles críticos muy diferentes se pueden establecer dependiendo de muchos supuestos y consideraciones (Mallarino y Blackmer, 1992). Además, reconocido explícitamente o no, los científicos introducen sus propios sesgos acerca de las consideraciones más importantes y la filosofía de manejo más apropiada. La **Figura 1** muestra, como ejemplo, la correlación del análisis de suelo de P con la respuesta de maíz y soja a la aplicación de P en Iowa, y las actuales clases de interpretación.

Conceptos para la interpretación de análisis de suelos y recomendaciones de fertilización

Los conceptos y filosofías para las interpretaciones de análisis de suelos y recomendaciones de fertilización varían a través de los estados de EE.UU. y los países. Algunos enfatizan la rentabilidad a corto plazo de los nutrientes aplicados, altos retornos económicos por unidad de nutriente, y reducido riesgo de sobre-aplicación aceptando un riesgo moderado de pérdida de rendimiento. Este concepto, suele estar referido a la filosofía de "suficiencia". Esta requiere de la utilización precisa y frecuente del análisis de suelo, y en general es más recomendable para suelos con una gran capacidad de retener el P o K aplicado en formas que no son disponibles para los cultivos (alta capacidad de "fijación"). Otros enfatizan la rentabilidad a largo plazo de

¹ Department of Agronomy, Iowa State University - Ames, Iowa, EE.UU. Correo electrónico: apmallar@iastate.edu

* Traducción al español del trabajo presentado en el XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo - XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 16-20 de Abril de 2012. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

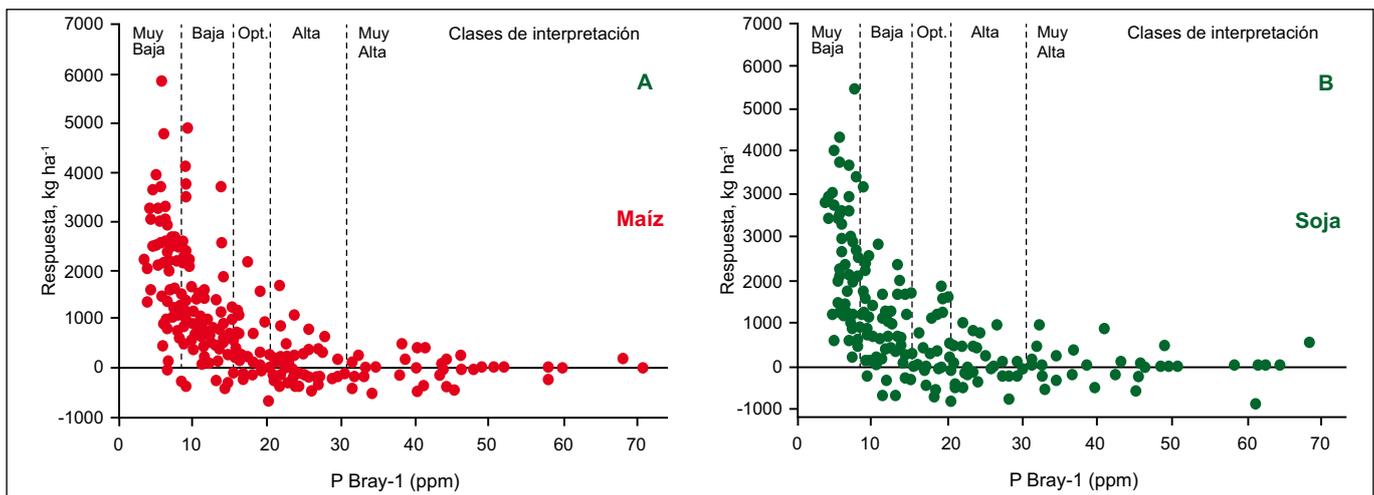


Figura 1. Relación entre la respuesta en rendimiento en grano de maíz (A) y soja (B) a la fertilización fosforada y los valores del análisis de suelo de P (P Bray-1; 0-15 cm). Los datos fueron tomados de Dodd y Mallarino (2005) y las clases de interpretación de Sawyer et al. (2002).

la fertilización, maximizar el retorno económico a largo plazo, el mantenimiento de niveles de análisis de suelo óptimos o ligeramente superiores a este, y la reducción de riesgo de pérdida de rendimiento debido a una fertilidad insuficiente. Este concepto, suele referirse a la filosofía de "construir y mantener". Esta puede no requerir análisis de suelo frecuentes, y en general, es recomendable para suelos que retienen pero no necesariamente "fijan" demasiado del P o K aplicado, y requiere del conocimiento de dosis de fertilizantes necesarias para mantener los niveles de análisis de suelo, que usualmente se basan en la remoción de P o K con o sin ajustes empíricos.

La mayoría de las interpretaciones de análisis de suelo, a menudo combinan aspectos de ambas filosofías de interpretación. Las interpretaciones y recomendaciones de nutrientes suelen diferir incluso con respuestas del cultivo y análisis de suelo aproximadamente similares, debido a que la filosofía y los supuestos de las mismas hacen que las recomendaciones también difieran. Las dosis de aplicación de P y K recomendadas para suelos con bajos niveles en el análisis en Iowa (Sawyer et al., 2002), se basan en datos de la respuesta de los cultivos, y están diseñadas para ser rentables y minimizar el riesgo de pérdida de rendimiento para una amplia gama de suelos donde la probabilidad de respuesta de los cultivos es muy alta. Estas dosis aumentarán gradualmente los niveles de análisis del suelo, a la categoría de valores óptimos, para lo cual la recomendación de fertilizantes se ha diseñado con el objetivo de mantener un nivel óptimo basado en estimaciones de extracción de P o K por los cultivos. La construcción moderada de niveles de análisis de suelo ocurre incluso con dosis óptimas económicas aplicadas a suelos con bajos niveles. Esto se explica por la absorción parcial de la planta, reciclando en el suelo con los residuos, y las propiedades del suelo que mantienen el P y K aplicado en formas disponibles para el cultivo a través del tiempo.

La mayoría de los suelos de Iowa y el cinturón maicero de EE.UU., no tienen propiedades químicas y mineralógicas

que se traduzcan en una transformación significativa del P o K aplicado en formas no disponibles (Dodd y Mallarino, 2005), como puede ocurrir en otras regiones. La mayoría de los suelos retienen P y K, pero esto no significa fijación en formas no disponibles para las plantas. Aunque los estudios indican que el 20% y el 30% del P o K aplicado es absorbido por un primer cultivo, el resto pasa a formar parte de una fracción del suelo que es o se vuelve disponible para los cultivos siguientes y se puede medir mediante análisis de suelo. Esto tiene dos consecuencias muy importantes. Una de ellas es que gran parte de los nutrientes aplicados pueden ser "depositados" en el suelo, y esto permite utilizar a largo plazo, el análisis de suelo y el manejo de los fertilizantes. Esto no es posible para N, y no puede ser eficiente para P o K en regiones donde una proporción importante de los nutrientes aplicados es retenida en los suelos en formas de poca disponibilidad para los cultivos. La otra consecuencia es que, en suelos con poca capacidad de "fijación", los métodos de aplicación de fertilizantes o productos que mejoran la eficiencia de uso de fertilizantes fosforados, no tienen el valor que pueden tener en los suelos con capacidad de fijación significativa. Esta es la razón por la cual las guías de manejo en el cinturón maicero rara vez sugieran el uso de métodos de ubicación para P o K, o el uso de productos que teóricamente aumentan la eficiencia del uso de nutrientes mediante la reducción de la reacción de P soluble, o fuentes de K en los suelos. Cientos de ensayos de campo realizados en Iowa y suelos similares de los estados vecinos han mostrado reducidas o nulas diferencias en el rendimiento de maíz (excepto los efectos de arranque en ciertas condiciones) o para soja manejada con siembra directa, labranza cero, labranza en franjas, o labranza en surcos, entre aplicaciones al voleo, en bandas poco profundas a la siembra y en bandas profundas. Sin embargo, las bandas pueden tener una ventaja cuando se aplican dosis bajas que limitan el rendimiento, y en otras regiones con clima más seco, o en suelos que realmente fijan el P aplicado.

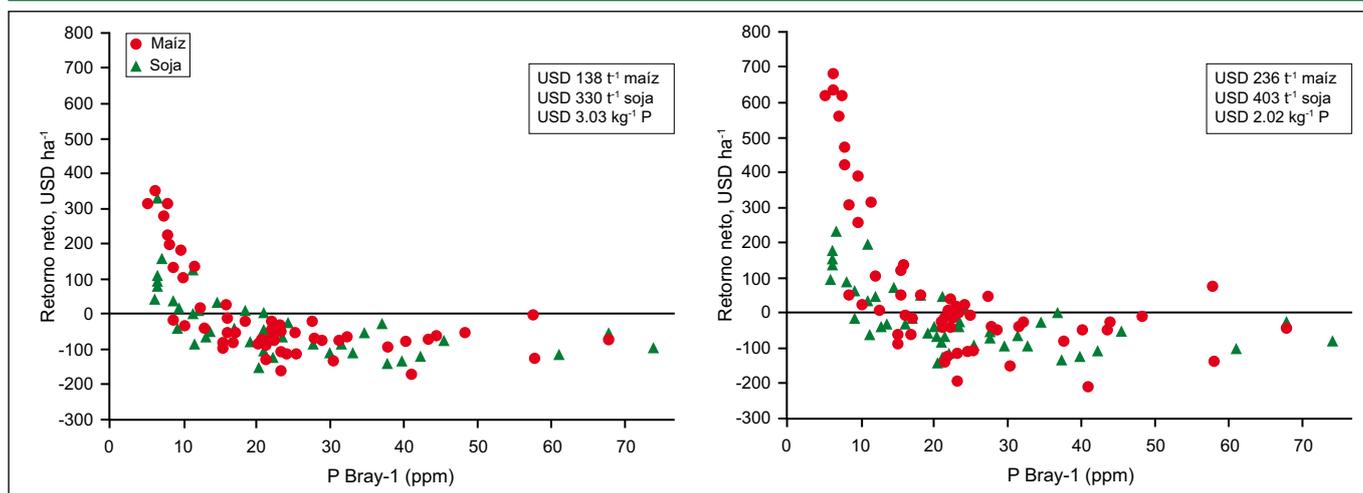


Figura 2. Retorno neto por aplicación de P para diferentes niveles de P en el suelo (P Bray-1; 0-15 cm) y relaciones de precios (Adaptado de Mallarino, 2009).

Considerando las relaciones de precios grano/fertilizante y la incertidumbre

En la medida que se incrementan los niveles de nutrientes en los análisis de suelo, la probabilidad de incremento en rendimiento por fertilización y la magnitud de las respuestas de rendimiento o económicas, decrece. Las relaciones de precios influyen en la dosis de fertilizante que debería ser aplicado cuando se intenta optimizar la rentabilidad de la fertilización y la producción de los cultivos. No importan las filosofías de interpretación, los retornos netos de la fertilización son mayores en suelos con bajos niveles de análisis, decrecen con el incremento de los niveles en el suelo y, usualmente se convierten en negativos para las categorías Alta y Muy Alta. La fertilización de suelos con bajos niveles de análisis, usualmente resulta en retornos significativos debido a que la probabilidad de respuesta se incrementa. Los resultados experimentales de Iowa en la **Figura 2**, muestran los retornos netos por fertilización en función de los niveles del análisis de suelo y las relaciones de precios.

Las **Figuras 1 y 2** muestran el grado de incertidumbre que siempre existe cuando se relacionan los niveles de análisis de suelo con la respuesta del cultivo a la fertilización o la rentabilidad económica de la práctica. El análisis del suelo no está libre de error o incertidumbre, y los resultados pueden ser interpretados de maneras muy diferentes dependiendo de muchos factores. El error de muestreo debido a la gran variabilidad espacial y el sesgo del laboratorio son grandes, y deben ser reconocidos como una fuente de incertidumbre. La incertidumbre también se debe a las dificultades de predecir con exactitud las condiciones que limitan la respuesta a la fertilización, o inducen una respuesta mayor a la esperada. Por lo tanto, es muy importante que las recomendaciones proporcionen una idea de la probabilidad de respuesta para las diferentes categorías de análisis de suelo. La investigación de campo en Iowa, ha reportado porcentajes esperados promedio de probabilidad de respuesta a P o K dentro de cada categoría de análisis de suelo (**Figura 1**), siendo

aproximadamente el 80% en Muy Baja, el 65% en Baja, 25% en la Óptima, el 5% en Alta, y <1% para Muy Alta. Estas estimaciones se proporcionan en la publicación de las recomendaciones (Sawyer et al., 2002).

La aplicación de fertilizantes en dosis más bajas de lo necesario para lograr el máximo rendimiento neto, resultará en un mayor retorno por unidad de nutriente aplicado. Esto se debe a la relación curvilínea habitual hacia una forma de meseta de la respuesta del cultivo en los valores altos de fertilidad o de análisis de suelo. La **Figura 3** muestra un ejemplo del aumento de rendimiento de grano y los ingresos netos de la fertilización en un suelo con bajo P. La rentabilidad total máxima se alcanza a una dosis inferior a la que maximiza el rendimiento, la diferencia entre ambas dosis depende de las relaciones de precios. Mayores dosis disminuyen la rentabilidad total, y las dosis excesivamente altas pueden incluso dar lugar a respuestas económicas negativas. Por lo tanto, los productores deben estudiar cuidadosamente si deben reducir, y cuánto, las dosis de aplicación a los suelos con bajo nivel en el análisis. Una buena decisión requiere la consideración de muchos factores, que incluyen la filosofía de manejo de negocios del productor. Una dosis baja de aplicación puede incrementar el retorno por unidad de fertilizante aplicado, pero puede limitar el rendimiento, el retorno total de la inversión en fertilizantes, y la rentabilidad total para el sistema de producción. Con una baja magnitud o probabilidad de respuesta del cultivo, el riesgo de un exceso de la aplicación de fertilizantes es mucho mayor (**Figura 3**). En algunas regiones, se pueden lograr niveles similares de rendimiento con bajos niveles en el análisis de suelo mediante la aplicación reducida en bandas, en comparación con la fertilización al voleo. Sin embargo, la investigación en muchos campos ha demostrado que raramente este sea el caso en los suelos de Iowa y la zona maicera (Bordoli y Mallarino, 1998; Borges y Mallarino, 2000; Kaiser et al., 2005). A pesar de ello, la aplicación en bandas puede ser un buen método para aplicar P de manera uniforme y precisa, y se puede utilizar junto con otras prácticas de manejo que generan beneficios (tales como la labranza en franjas o insecticida aplicado sobre el surco).

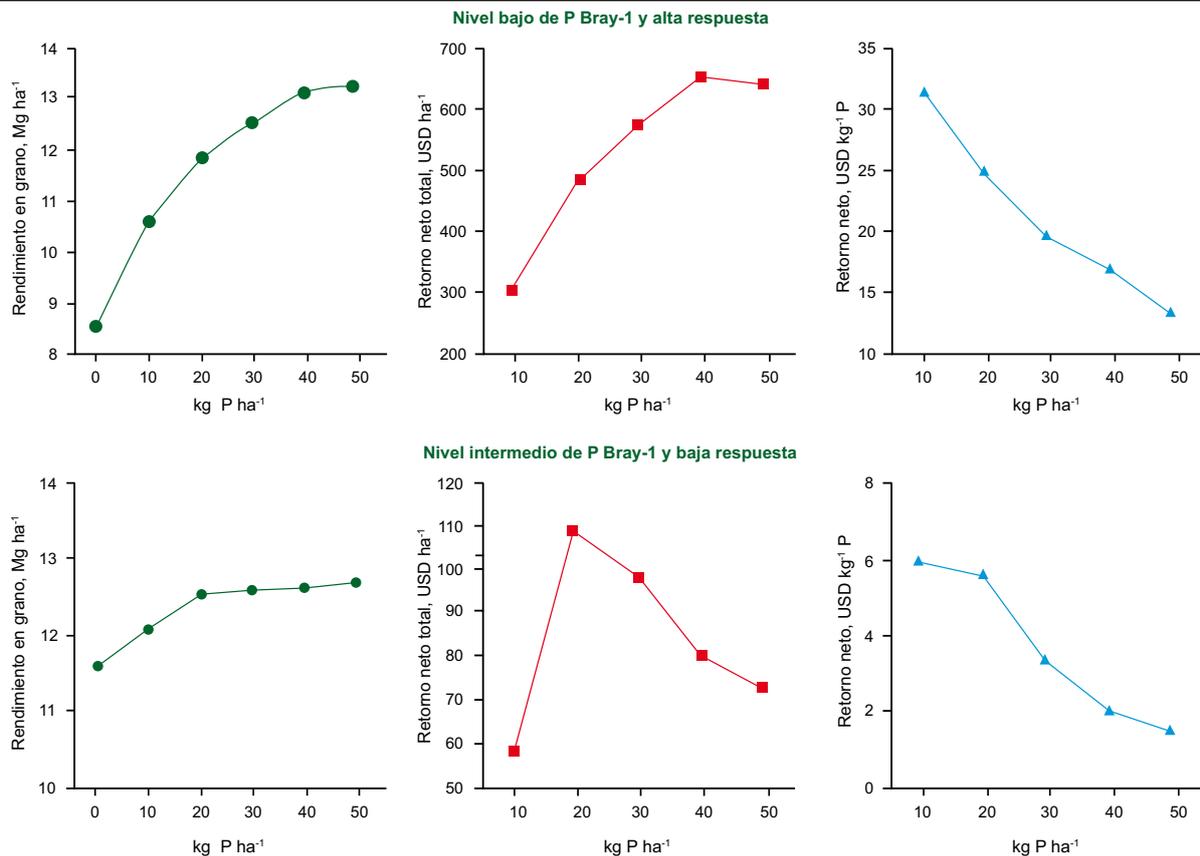


Figura 3. Respuesta en rendimiento de maíz a la fertilización fosfatada, ingresos netos totales, e ingresos por unidad de P aplicado (suponiendo USD 167 t⁻¹ para grano de maíz y USD 3.03 kg⁻¹ de P) en suelos de categoría “baja” e “intermedia” de P Bray-1.

En los suelos con altos niveles en el análisis, la probabilidad de una pérdida de la inversión en la fertilización de un cultivo es alta debido a que la probabilidad de respuesta en producción es baja o nula. En estos casos, una disminución en los niveles del suelo, también puede reducir el riesgo de deterioro de la calidad del agua. Por lo tanto, evitar la fertilización innecesaria en los suelos con altos niveles es el cambio más rentable que un productor puede utilizar en épocas de precios altos o inciertos. Algunos creen que permitir esta reducción podría no ser una buena decisión de negocios porque los precios de los fertilizantes pueden ser aún mayores en el futuro. Este es un tema que cada productor debe considerar, pero en general no es una buena decisión en el manejo de nutrientes. Sin embargo, la toma de decisiones para niveles intermedios no es simple, y no hay una sola respuesta válida para todas las condiciones.

¿Qué nivel de análisis de suelo debería ser mantenido?

La aplicación de fertilizantes o estiércol y la extracción de P o K con la cosecha de los cultivos, son los factores más importantes que determinan el cambio en los niveles de dichos nutrientes en los análisis de suelo de muchas regiones a través del tiempo. Los niveles de rendimiento varían considerablemente y, por lo tanto, tienen un gran impacto en la extracción de nutrientes. La investigación ha demostrado que se puede mantener un nivel aproximado al óptimo de análisis de suelo, mediante la aplicación de

P o K en dosis equivalentes a la remoción por parte de los cultivos, siempre y cuando los niveles de rendimiento supuestos y las concentraciones de nutrientes de los productos cosechados sean los apropiados (Mallarino et al., 2011). Sin embargo, la **Figura 4** muestra que la relación entre la remoción de P y el análisis de P en el suelo, es clara y congruente sólo en un periodo de años y puede ser muy variable e incongruente de año en año. La investigación ha demostrado que la variación en los niveles de producción no afecta los niveles críticos de P o K, o solo los incrementa en una magnitud muy pequeña, por lo menos en los niveles más altos de rendimiento que se observan actualmente en Iowa. Por otro lado, el tener en cuenta el nivel de rendimiento, especialmente en maíz, es muy importante para aumentar los niveles de P y K en el suelo hacia valores deseados y para mantener estos niveles respondiendo a la extracción.

Aunque el concepto de fertilización de mantenimiento de P o K está bien establecido en los EE.UU., aún es poco conocido por algunos productores y consultores agrícolas de EE.UU. y otros países. El uso de este concepto es una de las evidencias más claras de la filosofía de manejo de la fertilidad. Por ejemplo, el mantenimiento de un nivel de nutrientes en el análisis de suelo no es considerado por una filosofía estricta de nivel de suficiencia. Las recomendaciones a menudo no especifican el criterio utilizado para establecer el rango de valores a mantener, ni el beneficio económico de la fertilización de mantenimiento. Las recomendaciones de Iowa indican

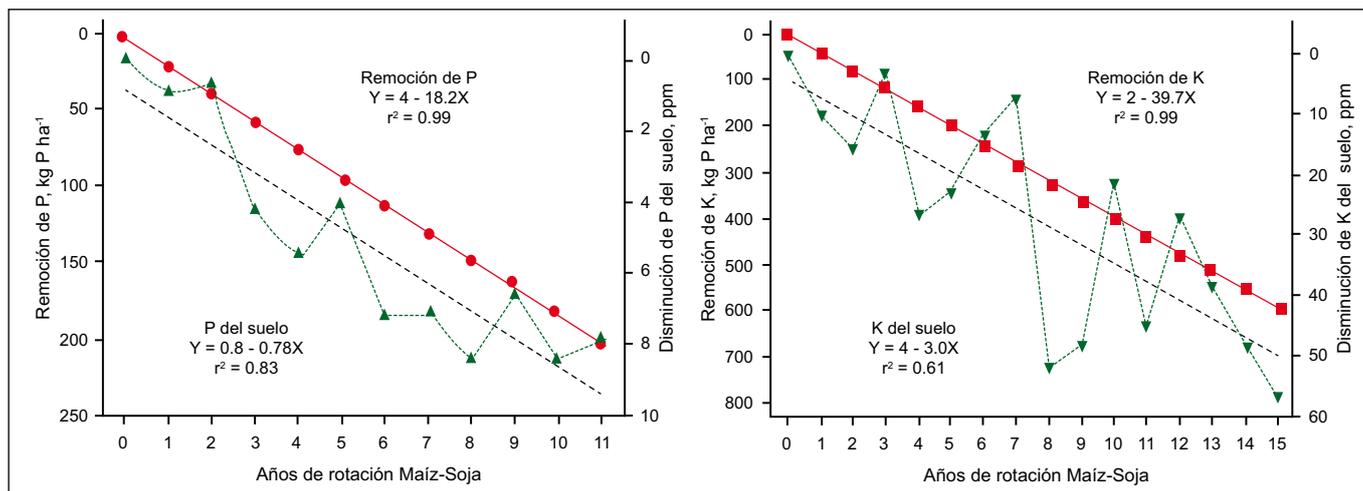


Figura 4. Tendencia de los niveles de análisis de suelo y la remoción por cosecha de P y K, para rotaciones maíz-soja a través del tiempo en parcelas que no recibieron fertilización con P o K (promedios de 5 sitios de Iowa). Los símbolos rojos indican remoción por cosecha y los verdes el nivel de P o K del suelo.

claramente que el objetivo de la fertilización basada en la extracción por cosecha es mantener un rango (Óptimo) de valores en el suelo, que resulta en una probabilidad del 25% de obtener pequeñas respuestas. Por lo tanto, estas dosis de aplicación están diseñadas para mantener los valores de análisis de suelo y eliminar la deficiencia de nutrientes, pero no necesariamente para maximizar los beneficios de la fertilización de un cultivo. El descenso del análisis de suelo sin suficiente aplicación de P o K, es pequeño en un año y gradual en el tiempo (Figura 4). Por lo tanto, un productor podría reducir o demorar la aplicación de fertilizantes para esta categoría de análisis de suelo, dependiendo de varios factores. La aplicación de una dosis más baja puede ser razonable cuando la relación de precios fertilizante/grano es mayor de lo habitual, el suministro de fertilizantes es escaso, o los fondos limitados son requeridos para otros insumos de producción más importantes. Por otro lado, algunos productores pueden creer que un 25% de probabilidad de ocurrencia de una pérdida de rendimiento, incluso siendo pequeñas, no es aceptable teniendo en cuenta los altos costos de otros insumos o los costos fijos de producción. Por otra parte, las percepciones acerca de la cosecha del próximo año y los precios de los fertilizantes, pueden alentar a los productores para no aplicar la fertilización de mantenimiento o una dosis de construcción.

Consideraciones de tenencia de la tierra y riesgo

La tenencia de la tierra y el enfoque de manejo empresarial del productor son de gran influencia en la cantidad de P y K que se aplica, principalmente, con valores de análisis de suelo cercanos a los niveles óptimos. La tenencia de la tierra no es una consideración para la economía de la fertilización nitrogenada, pero debe ser una consideración clara para el manejo de P y K, debido a los efectos residuales de la aplicación y la posibilidad de manejarlos a largo plazo, mencionada anteriormente. Hace muchos años, Fixen (1992) demostró que las tasas de interés y la tenencia de la tierra pueden tener un gran impacto en el nivel de análisis de suelo considerado óptimo para los

cultivos. La reducción de las dosis de fertilización con P y K en los suelos con bajos niveles, con una tenencia segura de la tierra, no es una buena decisión de negocios porque hay una alta probabilidad de respuesta de rendimiento, incrementa el riesgo de pérdida de rendimiento y de beneficios limitados del sistema de producción y, por otra parte, un exceso de aplicación a un cultivo no significa un exceso en la rotación. Incluso con tenencia incierta de la tierra, no se recomienda una reducción en la dosis de P y K en estos suelos, pues existe una alta probabilidad de respuestas de gran magnitud. Sin embargo, con tenencia incierta de la tierra, y niveles óptimos de análisis de suelo, la dosis de fertilización de mantenimiento puede ser reducida debido a que hay una baja probabilidad de respuesta de los cultivos. Si la reducción de la dosis de aplicación de nutrientes se prolonga en el tiempo, sin embargo, el total de ingresos netos por la fertilización y la productividad futura pueden ser limitados. Por lo tanto, con la tenencia de la tierra incierta y de alto riesgo, las decisiones sobre el mantenimiento de un nivel o rango deseable de análisis de suelo, dependen principalmente de la probabilidad de respuesta para ese rango y la actitud del productor hacia el riesgo.

Análisis de suelo de P y efectos de la dosis de aplicación en la calidad de agua

Las normas relativas a la protección de la calidad del agua por pérdida excesiva de P desde los campos también pueden afectar las decisiones sobre la aplicación de fertilizante o estiércol. Dosis de aplicación altas que aumentan la concentración de P del suelo a niveles mucho más altos que los niveles óptimos para los cultivos, aumentan el riesgo de pérdida de P y la eutrofización de los cuerpos de agua superficiales. El P suele ser el nutriente que limita y controla el crecimiento de algas en cuerpos de agua dulce. La eutrofización se produce cuando el crecimiento excesivo de algas y la reducción de los niveles de oxígeno del agua debido a los altos niveles de nutrientes resulta en desequilibrios en los ecosistemas acuáticos, muerte de peces, aumento de

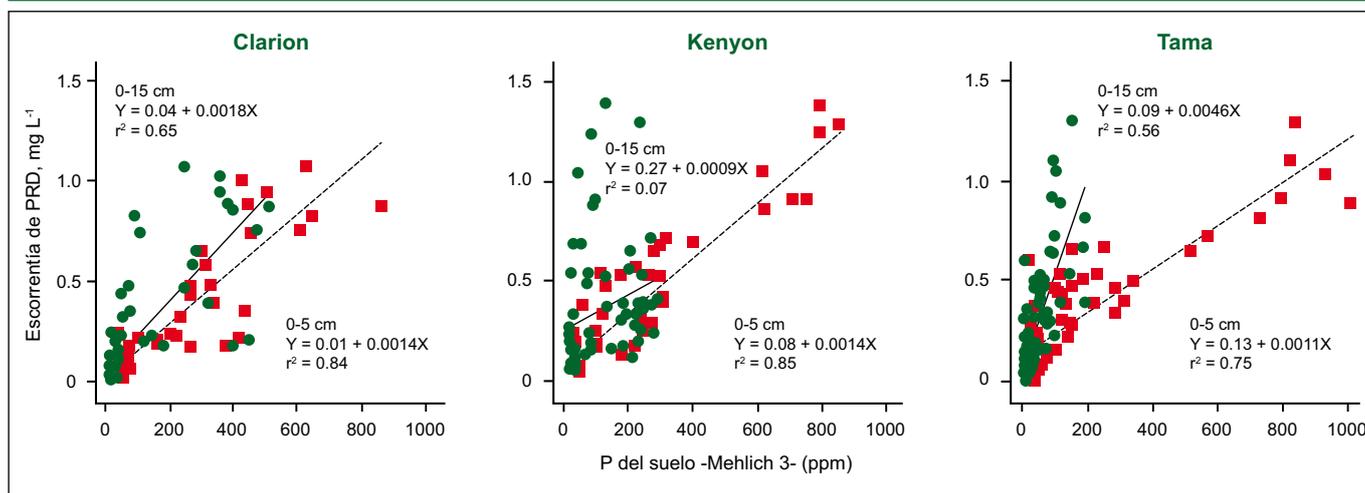


Figura 5. Relación entre el P reactivo disuelto (PRD) en escorrentía y el nivel de P medido en análisis de suelo para los estratos 0-5 cm (cuadrados rojos) y 0-15 cm (círculos verdes), en suelos de Iowa manejados con rotación maíz-soja y labranza convencional o siembra directa.

microorganismos productores de toxinas, y la reducción del valor estético de los lagos o arroyos. La producción de ganado resulta en grandes cantidades de estiércol que es una fuente valiosa de nutrientes para la producción de altos rendimientos de los cultivos, y se puede utilizar para minimizar el uso de fertilizantes inorgánicos y conservar las fuentes de nutrientes no renovables. Los análisis de suelo de P son a menudo muy elevados en los ámbitos donde se aplica estiércol sin tener en cuenta las necesidades de nutrientes de los cultivos o basándose en las necesidades de N de los cereales. Este es especialmente el caso para el estiércol de aves de corral (baja relación N:P) y para cualquier estiércol aplicado en maíz continuo o trigo.

El concepto de calibración de análisis de suelos para la producción agrícola, también se aplica a la interpretación para el riesgo de deterioro de la calidad del agua. El significado de un determinado nivel de análisis de suelo, en términos de pérdida de nutrientes y el impacto sobre el crecimiento de algas, puede variar mucho entre las distintas profundidades de muestreo, métodos de análisis de suelo, las propiedades del suelo, el transporte de agua hacia los recursos hídricos, y las propiedades de los cuerpos de agua receptores. Las relaciones entre la concentración de P en la escorrentía superficial y el análisis de suelo muestran que el escurrimiento de P, generalmente se incrementa linealmente con el aumento del nivel en el análisis de suelo. La **Figura 5**, muestra cómo el nivel de P Mehlich-3 en el suelo, el tipo de suelo y la profundidad de muestreo afectan la concentración de P disuelto en la escorrentía superficial. El muestreo superficial del suelo, mejora en gran medida las relaciones en comparación con la profundidad de muestreo común de 0-15 cm, y esto se observó tanto para los campos cultivados como no cultivados (datos no mostrados). Sin embargo, el aumento del riesgo de pérdida de P, se vuelve claro y constante para los valores de análisis de suelo mayores de 30 a 40 ppm (0-15 cm de profundidad), que es el límite entre las clases de interpretación Alta y Muy Alta del análisis de suelo para dicho extractante. Los experimentos que analizan la

pérdida de P a través del drenaje sub-superficial, indican que la pérdida significativa comienza a producirse a un nivel de P del suelo cuatro a cinco veces mayor que los niveles óptimos de los cultivos (datos no mostrados). Por lo tanto, tanto la economía de la producción de los cultivos, como las preocupaciones ambientales, deben desalentar las estrategias de aplicación de fertilizantes fosfatados que aumentan el P extractable del suelo, en este caso con Mehlich-3, a niveles mucho más altos que los niveles óptimos para los cultivos.

Una pregunta frecuente es cómo se relacionan los métodos comúnmente utilizados para el análisis de P del suelo, con aquellos métodos diseñados para medir las formas de P más relevantes en el crecimiento de las algas. La investigación en Iowa ha mostrado una buena correlación entre las metodologías de análisis de rutina de P del suelo, y varios de los llamados "métodos ambientales" para análisis de P (Atia y Mallarino, 2002; Klatt et al., 2003; Allen y Mallarino, 2006; Allen et al., 2006). Se encontraron resultados similares en otros estados de los EE.UU. y, por lo tanto, los análisis de suelo de rutina utilizados para la producción agrícola, también se utilizan para las evaluaciones de riesgo de deterioro de la calidad del agua. Sin embargo, en algunas condiciones ambientales, los análisis de P en el suelo (por ejemplo, índices de saturación) predicen mejor los impactos del P sobre la calidad del agua. Estas condiciones incluyen suelos con propiedades extremas y niveles de P en el suelo varias veces superiores a los óptimos para los cultivos.

La incorporación del P en el suelo, sin aumentar significativamente la erosión, reduce la concentración de P en o cerca de la superficie, y puede reducir las pérdidas de P por escurrimiento. La investigación de campo en Iowa durante las últimas dos décadas, ha demostrado que la incorporación en el suelo, o el bandeo profundo, y la inyección del fertilizante o abono fosfatado en el suelo, no mejoran los rendimientos de los cultivos en comparación con aplicación al voleo, pero pueden reducir de manera significativa los eventos de escorrentía después de su aplicación en terrenos

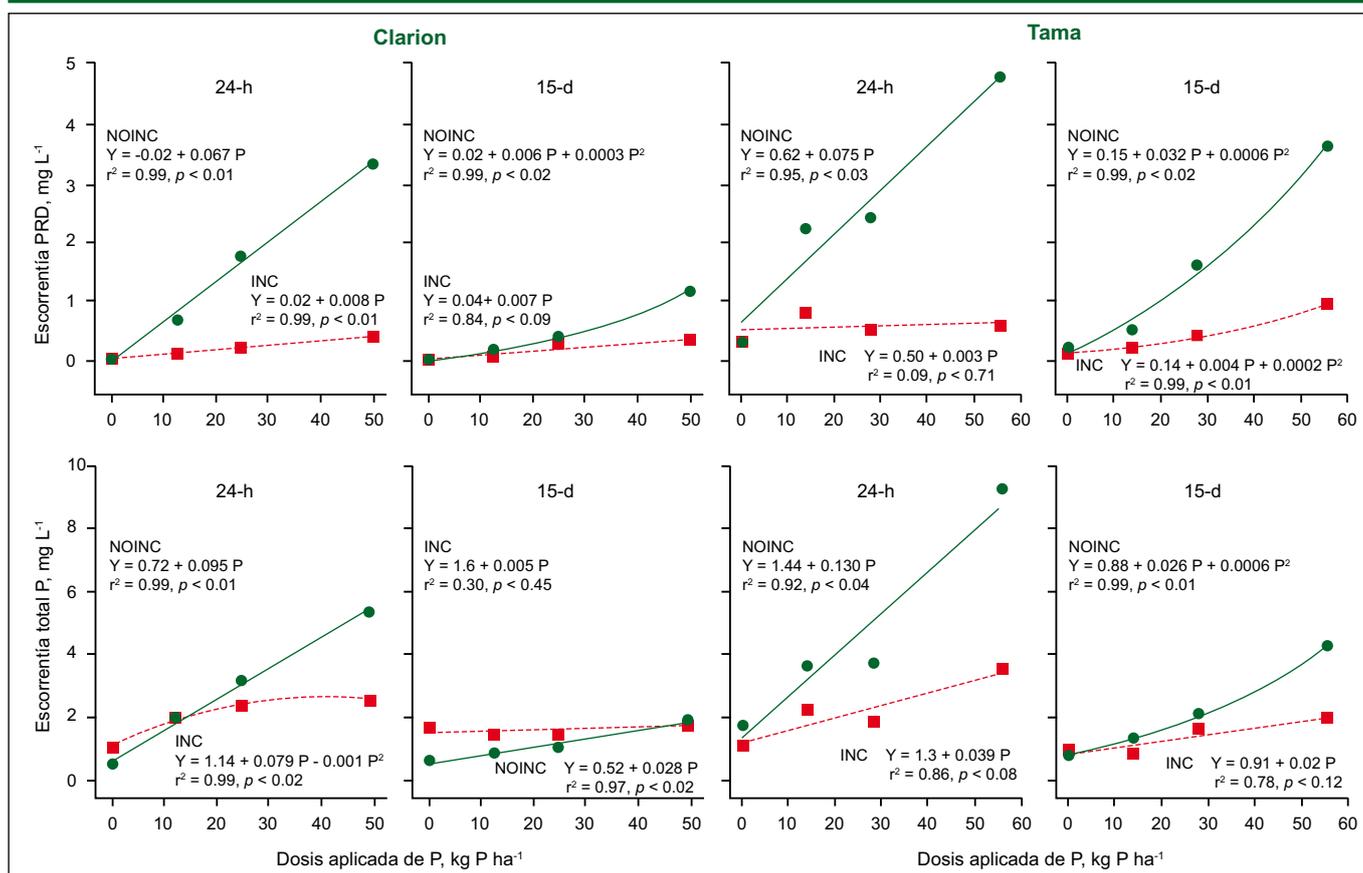


Figura 6. Efecto de la dosis de P, su incorporación o no, y el tiempo simulado de precipitación (24 horas, 15 días), sobre las concentraciones de P total y PRD de escorrentía para dos suelos en Iowa. INC: estiércol de cerdo incorporado (cuadrados rojos); NOINC: estiércol de cerdo no incorporado (círculos verdes). Adaptado de Allen y Mallarino (2008).

con pendiente. Sin embargo, esto no es necesariamente el caso de eventos de escorrentía lenta, o cuando la labranza o la operación de incorporación resultan en una mayor erosión del suelo. La muestra que la incorporación de P en el suelo (en este caso con arado de disco) reduce la pérdida del nutriente por eventos de escorrentía que ocurren poco después de las aplicaciones. Sin embargo, incluso con un retraso de unos días, el efecto de la incorporación es mucho menor (o nulo), o aumenta la pérdida de P a bajas dosis de aplicación. Resultados similares fueron observados en investigaciones con bajas dosis de aplicación de fertilizantes inorgánicos y otros tipos de abonos. Por lo tanto, la incorporación o el bandeado profundo de P en el suelo pueden reducir el riesgo de pérdida de P por escorrentía superficial y la erosión cuando la operación no aumenta la erosión del suelo o la pérdida de agua y, sobre todo, en temporadas con probables eventos de escorrentía. Esto es importante porque la siembra directa tiene muchas ventajas, y la consideración de la probabilidad de eventos de escorrentía para el calendario de aplicación de P puede disminuir la pérdida potencial del nutriente debido a la ausencia de incorporación al suelo.

Herramientas integrales de evaluación de riesgos para fósforo

Las consideraciones económicas no justifican las dosis de fertilizantes fosfatados mayores que lo necesario para optimizar el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, la utilización de N de abonos y la consideración de los costos de transporte del estiércol a grandes distancias, pueden

justificar la aplicación de éste a los suelos con altos niveles en el análisis de suelo, cuando los factores del sitio determinan un bajo riesgo de pérdida de P. Este es el motivo por el cual los factores del transporte afectan las pérdidas de suelo y agua de los campos, y a menudo son más importantes que el nivel de P en el suelo y la dosis de aplicación en la determinación del movimiento de P a los recursos hídricos por erosión, escorrentía superficial o del subsuelo. Esta es la razón por la que las herramientas de evaluación de riesgos o los índices de P fueron desarrollados. En los EE.UU., el índice P se requiere como parte del proceso de planificación del manejo de nutrientes por agencias reguladoras federales o estatales, cuando se aplica estiércol o cualquier fuente de P dentro de las cuencas con la calidad del agua deteriorada.

Los índices de P desarrollados en Iowa, y en la mayoría de los estados de EE.UU., no son modelos de transporte de P completos, pero son herramientas cuantitativas prácticas que proporcionan estimaciones razonablemente buenas del riesgo de pérdida y que pueden ser utilizados por los agricultores y consultores agrícolas avanzados. La mayoría de los índices de P que se han implementado incluyen una serie de características de los sitios relacionados con la fuente, el transporte y el manejo de P. Estas características (o factores) pueden incluir el potencial de erosión del suelo, la clase de escurrimiento del agua, el análisis de P en el suelo, y la dosis y métodos de aplicación de P de los fertilizantes y fuentes orgánicas, entre otros. Los primeros índices de P fueron cualitativos, y los diferentes factores se consideraban aditivos. A cada factor se le asignó una calificación relativa

de potencial de pérdida de P, con un valor numérico correspondiente, y un coeficiente de ponderación que se asigna a cada factor para reflejar su importancia relativa en contribuir a la pérdida del nutriente. El índice P se calculó multiplicando cada calificación potencial por su factor de ponderación correspondiente y sumando los resultados. El valor del índice para un campo individual se coloca en una categoría (por ejemplo, muy bajo a muy alto) con las interpretaciones y las recomendaciones correspondientes para el manejo del nutriente. Las versiones recientes del índice, desarrollado para determinadas regiones o estados, incluyen otros factores, y otra forma de estimación de las categorías de pérdida potencial de P para obtener el índice de P. Los factores adicionales en algunos de los índices de P incluyen la distancia al cuerpo de agua; la labranza, la vegetación, o el manejo del pastoreo; la hidrología del sitio (por ejemplo, pendiente y la longitud, la frecuencia de las inundaciones, clase de drenaje, drenaje subterráneo, etc.); y estimaciones del grado de saturación de P en el suelo.

El índice de P para Iowa utiliza un enfoque múltiple para combinar las fuentes y factores de transporte con tres componentes principales basados en los mecanismos de transporte de P más relevantes. Estos componentes son la erosión (P en sedimentos y partículas), la escorrentía, y el drenaje profundo (agua y P disuelto). Cada componente provee una estimación aproximada (o proporcional) a la cantidad de P transportado desde los campos a través de cada mecanismo de transporte que sería biológicamente disponible para ecosistemas acuáticos. Las salidas desde estos tres componentes se suman para obtener una aproximación general del total del P transportado biológicamente disponible. El número resultante (uno por campo o por cada unidad de manejo) es colocado en una de las cinco clases de riesgo (desde muy bajo a muy alto). Estas categorías se basan en conocimientos actuales sobre el impacto de las cargas de P en la eutrofización de los recursos hídricos. Para más detalles del índice de P para Iowa, ver Mallarino et al. (2002) y USDA-NRCS (2004).

Por lo tanto, la aproximación del índice de P es más integral y completa que confiar solamente en el análisis de suelo de P o los umbrales de dosis de fertilización, debido a que estos no proveen estimaciones razonables del potencial de transporte del nutriente hacia los cursos superficiales de agua, ni condiciones para pérdidas potenciales altas. El índice es una herramienta de evaluación más racional, y puede ser utilizada para identificar las prácticas de manejo de nutrientes, suelos y agua que pueden reducir en gran medida las pérdidas de P y el deterioro de la calidad del agua.

Bibliografía

Allen, B.L., y A.P. Mallarino. 2006. Relationships between extractable soil phosphorus and phosphorus saturation after long-term fertilizer or manure application. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:454-463.

Allen, B.L., y A.P. Mallarino. 2008. Effect of liquid swine manure rate, incorporation, and timing of rainfall on phosphorus loss with surface runoff. *J. Environ. Qual.* 37:125-137.

Allen, B.L., A.P. Mallarino, J.G. Klatt, J.L. Baker, y M. Camara. 2006. Soil and surface runoff phosphorus relationships for five typical USA Midwest soils. *J. Env. Qual.* 35:599-610.

Atia, A.M., y A.P. Mallarino. 2002. Agronomic and environmental phosphorus testing for soils receiving swine manure. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1696-1705.

Bordoli, J.M., y A.P. Mallarino. 1998. Deep and shallow banding of phosphorus and potassium as alternatives to broadcast fertilization for no-till corn. *Agron. J.* 90:27-33.

Borges, R., y A.P. Mallarino. 2000. Grain yield, early growth, and nutrient uptake of no-till soybean as affected by the phosphorus and potassium placement. *Agron. J.* 92:380-388.

Dahnke, W.C., y R.A. Olson. 1990. Soil test correlation, calibration, and recommendation. pp. 45-71. In R.L. Westerman (ed.). *Soil testing and plant analysis*, 3rd ed. SSSA, Madison, WI.

Dodd, J.R., y A.P. Mallarino. 2005. Soil-test phosphorus and crop grain yield responses to long-term phosphorus fertilization for corn-soybean rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:1118-1128.

Fixen, P. 1992. Role of land tenure and other factors in soil P interpretations. pp. 125-133. In North-Central Extension-Industry Soil Fertility Conf. Proceedings. Nov. 18-19. Vol. 8. Bridgeton, MO. <http://extension.agron.iastate.edu/nce>.

Kaiser, D.E., A.P. Mallarino, y M. Bermudez. 2005. Corn grain yield, early growth, and early nutrient uptake as affected by broadcast and in-furrow starter fertilization. *Agron. J.* 97:620-626.

Klatt, J.G., A.P. Mallarino, J.A. Downing, J.A. Kopaska, y D.J. Wittry. 2003. Soil phosphorus, management practices, and their relationship to phosphorus delivery in the Iowa Clear Lake agricultural watershed. *J. Env. Qual.* 32:2140-2149.

Mallarino, A.P. 2009. Long term phosphorus studies and how they affect recommendation philosophies. pp. 6-12. In North-Central Extension-Industry Soil Fertility Conf. Proceedings. Nov. 14-15. Vol. 25. Des Moines, IA. <http://extension.agron.iastate.edu/nce>.

Mallarino, A.P., y A.M. Blackmer. 1992. Comparison of methods for determining critical concentrations of soil test phosphorus for corn. *Agron. J.* 84:850-856.

Mallarino, A.P., B.M. Stewart, J.L. Baker, J.A. Downing, y J.E. Sawyer. 2002. Phosphorus indexing for cropland: Overview and basic concepts of the Iowa phosphorus index. *J. Soil Water Conserv.* 57:440-447.

Mallarino, A.P., R.R. Oltmans, J.R. Prater, C.X. Villavicencio, y L.B. Thompson. 2011. Nutrient uptake by corn and soybean, removal, and recycling with crop residue. p. 103-113. In *The Integrated Crop Management Conf. Proceedings*. Nov. 30 - Dec. 1, 2011. Iowa State Univ. Extension. <http://www.aep.iastate.edu/icm/proceedings/ICM11.pdf>.

Sawyer, J.E., A.P. Mallarino, R. Killorn, y S.K. Barnhart. 2002. General guide for crop nutrient recommendations in Iowa. Publ. Pm-1688 (reprinted in 2011). Iowa State Univ. Extension. Ames, IA. <http://www.extension.iastate.edu/Publications/PM1688.pdf>.

United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service (USDA-NRCS). 2004. Technical Note No. 25. The Iowa Phosphorus Index. Des Moines, IA. <http://www.ia.nrcs.usda.gov/technical/Phosphorus/phosphorusstandard.html>.

Producción forrajera con aplicación otoñal de fertilizantes nitrogenados en avena y en agropiro

María A. Marino¹ y Jorge Castaño²

Introducción

El manejo del nitrógeno (N) es un aspecto clave cuando se pretende avanzar hacia la sustentabilidad productiva y ambiental en los agro-ecosistemas. En la región pampeana de Argentina, la disponibilidad de las formas de N inorgánicas (NH_4^+ y NO_3^-) disminuye en la época fría del año (Echeverría y Bergonzi, 1995), lo que restringe la producción de forraje. Existe abundante información que demuestra que la fertilización nitrogenada permitiría atenuar estas deficiencias. Sin embargo, la mayoría de los trabajos cuantifican la respuesta al N agregado a la salida del invierno, momento en el cual se registran las mayores respuestas a dicho nutriente (Mazzanti et al., 1997; Marino et al., 2004; Barbieri et al., 2006; Agnusdei et al., 2010).

El N es un nutriente lábil, susceptible a pérdidas como volatilización, desnitrificación o lixiviación, y la magnitud de las mismas, cuando se realiza una fertilización nitrogenada, está relacionada principalmente con la formulación del fertilizante, las condiciones climáticas y las características del suelo. A modo de ejemplo, en pasturas implantadas en suelos bajos ganaderos del sudeste bonaerense se registraron pérdidas de hasta más del 30% del N aplicado en otoño bajo la forma de urea (Barbieri et al., 2006).

En general, la ganadería está siendo desplazada hacia áreas con limitaciones productivas, no aptas para el desarrollo de cultivos agrícolas. Sin embargo, sistemas mixtos que incluyen actividades agrícolas y ganaderas mantienen una proporción de cultivos forrajeros y pasturas en suelos agrícolas. Esta diversidad de ambientes debería ser considerada al momento de planificar las estrategias de fertilización.

Por otra parte, en la actualidad existen fertilizantes nitrogenados cuyas formulaciones podrían atenuar las pérdidas por volatilización y así aumentar la eficiencia de uso del N (EUN) aplicado. Sin embargo, la información disponible se ha generado fundamentalmente en

cultivos agrícolas siendo escasa la existente para recursos forrajeros en el sudeste de la provincia de Buenos Aires.

El objetivo del trabajo fue cuantificar el efecto del N aplicado al inicio de otoño (época cuando se registran condiciones ambientales predisponentes para que ocurran pérdidas por volatilización de N-NH_3) bajo formulaciones amoniacales y amídicas, sin y con inhibidor de la nitrificación, sobre la acumulación otoño-inverno-primaveral (O-I-P) de forraje en recursos forrajeros que se desarrollan en ambientes contrastantes: verdeo de avena (suelo agrícola) y pastura de agropiro (*Thinopyrum ponticum*; suelo ganadero). Este tipo de información permitirá avanzar en la planificación de estrategias de fertilización nitrogenada tendientes a aumentar la eficiencia de su uso en la producción de forraje y reducir las pérdidas al ambiente en los sistemas ganaderos.

Materiales y métodos

Los ensayos se establecieron en marzo de 2011 en la EEA INTA Balcarce (Buenos Aires), en dos ambientes contrastantes, en un cultivo de avena implantado en suelo de aptitud agrícola sin limitantes edáficas, y en una pastura de agropiro establecida en un suelo de aptitud ganadera con severas restricciones para el crecimiento de las plantas. Las características edáficas de ambos lotes se presentan en la **Tabla 1**.

Las condiciones climáticas registradas en el periodo febrero-octubre de 2011 (**Figura 1**), fueron comparadas con las del promedio histórico 1970-2010 para esos meses. Se pudo comprobar que, durante 2011, las temperaturas medias diarias manifestaron una leve superioridad y las precipitaciones fueron sustancialmente (39%) inferiores al promedio histórico 1970-2010 (387 vs 631 mm, respectivamente).

En los días próximos a las fechas de fertilización, las condiciones climáticas fueron predisponentes para el proceso de volatilización del N como amoníaco (NH_3).

Tabla 1. Contenido de materia orgánica (MO), fósforo extractable (Pe, Bray-1) y pH en los primeros 20 cm del perfil de suelo para los experimentos de avena y agropiro.

..... Avena Agropiro			
Suelo	MO %	pH	Pe ppm	Suelo	MO %	pH	Pe ppm
Argiudol típico	4.4	5.2	45	Natracuol típico	5.8	9.2	12

¹ Facultad de Ciencias Agrarias: Correo electrónico: amarino@balcarce.inta.gov.ar

² EEA INTA Balcarce.

* Trabajo presentado en el Simposio Fertilidad 2013: Nutrición de Cultivos Para la Intensificación Productiva Sustentable. 22-23 Mayo 2013. Rosario, Argentina.

En ninguno de los dos experimentos se registraron precipitaciones significativas en los cinco días posteriores a la fertilización nitrogenada.

En ambos experimentos se utilizó un diseño experimental en bloques con parcelas aleatorizadas, donde cada unidad experimental midió 1.5 m de ancho por 5 m de largo.

Al inicio de cada periodo de evaluación (28/02/2011 para agropiro y 30/03/2011 para avena) se aplicaron 20 kg ha⁻¹ de P (para evitar su deficiencia). Inmediatamente después se aplicaron los tratamientos de N que fueron: 0 (ON), 75 (75N) y 150 kg ha⁻¹ de N (150N) bajo la forma de urea granulada, 46-0-0(F1), UAN líquido, 32-0-0 (F2), nitrato de amonio calcáreo granulada 27-0-0 (F3) , y urea granulada, 46-0-0 con inhibidor enzimático (F4).

En cada periodo de crecimiento se realizaron cosechas del forraje acumulado, utilizando una motosegadora automotriz con la que se recolectó el forraje presente en el metro central de cada parcela dejando un remanente de 5 cm de altura. Del material cosechado, se extrajo una alícuota que se pesó y luego se secó en estufa a 60 °C hasta peso constante con la cual se determinó el contenido de materia seca (MS).

Se cuantificó la cantidad de material remanente posterior a la cosecha cortando una muestra a nivel del suelo de 0.1 m². A partir de la acumulación de forraje cuantificada se estimó la eficiencia aparente de uso del fertilizante aplicado, como la relación entre el incremento de forraje acumulado con cada tratamiento fertilizado (kg MS ha⁻¹ tratamiento fertilizado – kg MS ha⁻¹ ON) y la dosis de N aplicada.

Los resultados fueron analizados por ANVA (Proc GLM de SAS). La cuantificación estacional de forraje producido fue analizada estadísticamente como mediciones repetidas en el tiempo y se compararon las diferencias entre medias por el Test de Duncan ($p < 0.05$).

Resultados y discusión

No se registraron interacciones significativas entre los factores fuente de N y dosis de N aplicada, por lo tanto se analizó separadamente el efecto de cada uno de ellos sobre la producción estacional de forraje en la pastura de agropiro y en el verdeo de avena.

Fuentes nitrogenadas

Las respuestas al agregado de los fertilizantes nitrogenados en otoño difirieron según el experimento considerado. Para la pastura de agropiro, la producción de forraje no difirió entre fuentes de N aplicadas en ninguno de los tres periodos de crecimiento evaluados (**Tabla 2**). La producción acumulada de forraje durante el ciclo otoño-invierno-primavera promedio para las fuentes nitrogenadas fue de 5628 kg MS ha⁻¹.

Barbieri et al. (2006) han encontrado elevadas pérdidas por volatilización de N aplicado en forma de urea en

ambientes semejantes al de la pastura de agropiro. Sin embargo, en el presente experimento la producción de forraje no reflejó posibles diferencias entre fuentes nitrogenadas en la disponibilidad de N para las plantas.

En cambio en el verdeo de avena, a excepción del primer periodo de rebrote, la producción forrajera difirió entre los fertilizantes nitrogenados. En el segundo periodo de rebrote, la producción de forraje de avena con F1 fue significativamente inferior a F3 y F4, y en el último periodo de rebrote, F1 fue significativamente menor a F2, F3 y F4 (**Tabla 2**). Para esta especie, la producción acumulada otoño-invierno-primaveral de forraje para F1 fue de aproximadamente 4000 kg MS ha⁻¹, mientras para las restantes fuentes evaluadas se cuantificaron valores promedio próximos a 5000 kg MS ha⁻¹.

Las diferencias halladas entre los dos experimentos en la respuesta a la aplicación otoñal de los fertilizantes nitrogenados, podrían atribuirse por una parte a disimilitudes en las propiedades edáficas. En una campaña con precipitaciones inferiores al promedio histórico, como se registró en el año 2011 (**Figura 1**), las características del suelo ganadero (elevado pH, alto contenido de arcillas y de NaCO₃, drenaje deficiente) habrían restringido la producción de forraje sobre todo en el otoño cuando se registró una severa deficiencia hídrica (Vázquez et al., 2000).

Por otro lado, agropiro es una especie forrajera perenne que desarrolla un profundo y extenso sistema radical, lo cual le confiere la capacidad de utilizar eficientemente los recursos que ofrece el suelo (básicamente agua y nutrientes). Esta característica habría favorecido la captura del N disponible proveniente tanto de la mineralización como del N aplicado con los fertilizantes, independientemente de la formulación de estos últimos.

En el experimento de avena, el suelo agrícola no presentaba las limitantes al crecimiento de las plantas mencionadas para el suelo ganadero. Sin embargo, por su condición de cultivo anual, las plantas de avena presentan un sistema radical menos desarrollado en profundidad y con menor exploración del perfil de suelo que la pastura de agropiro. Esto determina que el crecimiento de las plantas esté en gran medida controlado por la disponibilidad de recursos (agua y nutrientes) en el horizonte superficial. Como se puede observar en la **Tabla 2**, F1 presentó menores acumulaciones de forraje en los tres periodos de rebrote evaluados, aunque las diferencias fueron estadísticamente significativas sólo en el segundo y tercero. Esto podría asociarse con mayores pérdidas desde el fertilizante amónico con respecto a las restantes fuentes de N, lo que habría reducido su disponibilidad de N para el verdeo de avena. Es posible que, diferencias en la disponibilidad de N en el estrato superficial por efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados, se hubieran reflejado en la captura del nutriente y, por consiguiente, en la acumulación de forraje obtenida (**Tabla 2**). En este sentido, Fontanetto et

al. (2008) registraron diferencias significativas entre fuentes nitrogenadas en el cultivo de avena. Mayores producciones de forraje fueron cuantificadas cuando el N se aplicó bajo la forma de UAN que con urea.

Dosis de N aplicado

A excepción del periodo de crecimiento otoñal en agropiro, en ambos experimentos la acumulación de forraje cuantificada para los tratamientos con P y ON fue significativamente inferior a las establecidas para los tratamientos con fertilización P+N. Así, en agropiro el tratamiento sin agregado de N mostró acumulaciones de forraje que representaron el 81%, 46% y 63% de las acumulaciones obtenidas para los tratamientos con N, para el crecimiento de otoño, invierno y primavera, respectivamente. La baja respuesta a la disponibilidad

de N en el primer periodo de rebrote podría atribuirse a la restricción al crecimiento de agropiro ocasionada por la deficiencia hídrica otoñal (**Figura 1**).

En avena, la limitación al crecimiento por deficiencia de N fue mayor sobre todo durante el rebrote invernal, con valores para ON que fueron de 41%, 24% y 62% para el primer, segundo y tercer periodo de rebrote, respectivamente (**Tabla 2**).

Para el crecimiento invernal e invierno-primaveral, se detectaron diferencias significativas entre las dosis de 75 y 150 kg N ha⁻¹ tanto en pasturas de agropiro como en verdes de avena (**Tabla 2**). Esto puede atribuirse a que durante ese período se registran valores mínimos de N edáfico, insuficientes para abastecer la demanda de las plantas (Echeverría y Bergonzi, 1995).

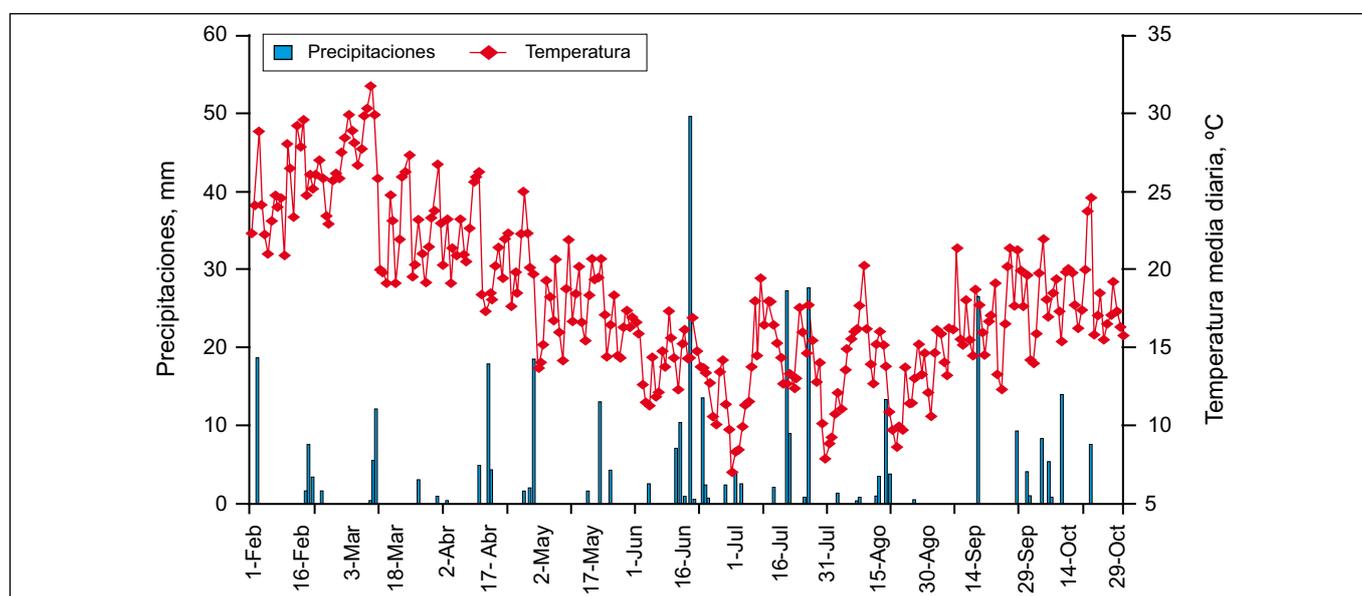


Figura 1. Temperaturas medias diarias y precipitaciones registradas en el periodo enero–octubre 2011. Fuente: Agrometeorología EEA INTA Balcarce.

Tabla 2. Rendimiento estacional de forraje (kg MS ha⁻¹) en los experimentos de avena y de agropiro para las fuentes nitrogenadas y las dosis de N evaluadas. Letras distintas en cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos (p<0.05).

Fuente	Agropiro			Avena		
	28/02 al 04/05	05/05 al 03/11	04/11 al 27/12	30/03 al 28/06	29/06 al 22/09	23/09 al 03/11
F1	1372	1716	2333	1709	1342 b	972 b
F2	-	-	-	1926	1470 ab	1405 a
F3	1406	1884	2460	1844	1779 a	1345 a
F4	1350	1970	2393	1822	1839 a	1353 a
valor-p	0.948	0.400	0.679	0.709	0.052	0.013
Dosis N						
ON	1250	1191 c	1803 c	992 c	597 c	906 b
75N	1344	1808 b	2500 b	2062 b	1702 b	1469 a
150N	1533	2572 a	2882 a	2422 a	2524 a	1431 a
valor-p	0.267	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

Respuestas positivas a la aplicación otoñal de N sobre la producción de forraje en pasturas de agropiro han sido registradas previamente en la región por Alonso et al. (2000) y Barbieri et al. (2006). Asimismo, fueron encontrados efectos de la aplicación otoñal de N sobre la producción de forraje de verdeos invernales de avena por Fontanetto et al. (2008) y Castaño et al. (2011) y para raigrás anual por Rodríguez Lahitte et al. (2004).

Cuando se considera la producción acumulada O-I-P, el tratamiento con aplicación de P sin agregado de N representó el 60% y el 40% de las producciones obtenidas con P y sin limitaciones en el suministro de N para la pastura de agropiro y el cultivo de avena, respectivamente (**Tabla 2**). De esta manera, se ratifica que los cultivos forrajeros anuales son altamente dependientes del abastecimiento de nutrientes y la deficiencia de nutrientes tendría un mayor impacto que en especies perennes (Agnusdei y Marino, 2008).

A pesar que en los experimentos evaluados se registraron restricciones hídricas para el crecimiento de las pasturas, considerando la producción O-I-P de forraje se pudieron establecer eficiencias agronómicas para las aplicaciones de 75 y 150 kg N ha⁻¹ de 36 y 26 kg MS kg⁻¹ N aplicado en avena y de 19 y 18 kg MS kg⁻¹ N aplicado en agropiro, respectivamente. Estas respuestas son coincidentes a las cuantificadas en trabajos locales para fertilizaciones invernales en verdeos invernales (Mazzanti et al., 1997; Marino et al., 2004) y otoñales en agropiro por Barbieri et al (2006) y Alonso et al. (2000).

Conclusiones

En el cultivo de avena, la producción de forraje obtenida con la aplicación de urea granulada (F1) fue significativamente inferior a las restantes fuentes nitrogenadas. En cambio, en la pastura de agropiro no se detectaron diferencias entre los fertilizantes aplicados.

La fertilización nitrogenada incrementó significativamente la producción invierno-primaveral de forraje en la pastura de agropiro y la producción en los tres periodos evaluados en el cultivo de avena.

Si bien ambos recursos forrajeros manifestaron la limitación en la producción de forraje por efecto de la deficiencia de N, los datos obtenidos ratifican una alta sensibilidad del cultivo de avena al abastecimiento del nutriente y el elevado impacto de su deficiencia en la producción de forraje.

Bibliografía

Agnusdei, M.G., M.A. Marino, y F.A. Lattanzi. 2008. Resources use efficiency in tall fescue and annual ryegrass pastures with different nitrogen nutrition (Humid Pampa, Argentina). In: Multifunctional Grasslands in a Changing World. (Ed: Organizing Committee of the IGC/IRC Congress. Guangdong

People's Publishing House. Vol.I: 300 p.

Agnusdei, M.G., S.G. Assuero, F.A. Lattanzi, y M.A. Marino. 2010. The use of the Nitrogen Nutrition Index to predict responses to N fertilization. Nutrient Cycling in Agroecosystems. Publicado online 16 de febrero 2010. DOI:10.1007/s10705-010-9348-6.

Alonso, S.I., J.A. Fernández, C.I. Borrajo, y H.E. Echeverría. 2000. Cambios en producción y calidad del forraje otoño-invernal por el agregado de nitrógeno en materiales genéticos de agropiro. Ciencia del suelo 18(2):115-124.

Barbieri, P.A., H.E. Echeverría, H.R. Sainz Rozas, y L.I. Picone. 2006. Nitrogen use efficiency from urea applied to a tall wheatgrass (*Elytrigia elongata*) prairie in a sodic soil. Australian Journal of Experimental Agriculture, 46:535-543.

Castaño, J., M.A. Marino, y M.G. Agnusdei. 2011. Producción de forraje del doble cultivo avena – raigrás anual con diferente suministro de nitrógeno. 34° Congreso Argentino de Producción Animal – 1st Joint Meeting ASAS – AAPA, Mar del Plata, Argentina. En CD.

Echeverría, H.E., y R. Bergonzi. 1995. Estimación de la mineralización de nitrógeno en suelos del sudeste bonaerense. Boletín Técnico No. 135 1995. 15 p. CERBAS, Centro Regional Buenos Aires Sur, INTA. EEA Balcarce.

Fontanetto H., O. Keller, F. García, e I. Ciampitti. 2008. Fertilización nitrogenada en avena. Informaciones Agronómicas 38:25-26.

Mazzanti, A., M.A. Marino, F. Lattanzi, H. Echeverría, y F. Andrade. 1997. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre el crecimiento y la calidad del forraje de avena y raigrás anual en el sudeste bonaerense. Boletín Técnico No. 143. ISSN 0522-0548.SAGPyA, INTA CERBAS EEA Balcarce.

Marino, M.A., R.C. Fernández Grecco, y M.G. Agnusdei. 2004. Producción otoño-invernal y eficiencia de uso del nitrógeno de raigras anual: métodos de siembra y fertilización nitrogenada. "27° Congreso Argentino de Producción Animal". Tandil. Rev. Arg. Prod. Anim. Vol. 24 Supl.: 183-184. ISBN-ISSN 0326-0550.

Rodríguez Lahitte, D., M.A. Marino, R.C. Fernández Grecco, y M.G. Agnusdei. 2004. Crecimiento otoño-invierno-primaveral de raigrás anual en diferentes fechas de siembra y niveles de fertilización nitrogenada. "27° Congreso Argentino de Producción Animal". Tandil. Rev. Arg. Prod. Anim. Vol. 24 Supl.: 188-189. ISBN-ISSN 0326-0550.

Vázquez, P., J.L. Costa, G. Monterrubianesi, y P. Godz. 2001. Predicción de la productividad primaria de pastizales naturales de la pampa deprimida utilizando propiedades del horizonte A. Ciencia del Suelo 19(2):136-143. 🌱

Fertilización en sorgo en el norte y centro-oeste de Buenos Aires

Rendimiento y eficiencia comparada al maíz

G.N. Ferraris¹, M. Barraco², L. Ventimiglia³, L. Couretot¹, y F. Moussegne¹

Introducción

El sorgo granífero (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) es una especie cuya adaptación ha permitido su amplia difusión en todas las regiones productivas. Si bien se acepta que expresa un gran potencial de respuesta a la fertilización, su eficiencia en el uso de nutrientes ha sido poco estudiada en Argentina, y se carece de metodologías de diagnóstico y rangos críticos que separen poblaciones de respuesta. Recientes trabajos indagan esta problemática (De Battista et al., 2010; Fontanetto et al., 2010; Zamora et al., 2010; Ferrari et al., 2012; Ferraris et al., 2012a). Reiteradamente se han utilizado recomendaciones validadas en otros cultivos como maíz sin evaluar la confiabilidad de este concepto, y aun más teniendo en cuenta que sorgo y maíz suelen ser cultivados en ambientes productivamente distintos.

En este trabajo se presentan los resultados de un ensayo de respuesta del cultivo de sorgo a la aplicación de nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S), zinc (Zn) y boro (B) realizado en Pergamino (Buenos Aires) en la campaña agrícola 2012/13 ("Pergamino 2012"). Los resultados del ensayo Pergamino 2012 se integran con los de ensayos anteriores realizados en el norte y centro-oeste de Buenos Aires, para 1) lograr el ajuste de curvas de respuesta a dosis creciente de N y 2) la comparación con las respuestas a N observadas en maíz.

Tabla 1. Tratamientos de fertilización en cultivos de sorgo. Pergamino. Campaña 2012/13.

Tratamientos de fertilización	
T0 - P ₀ N ₀	T5 - P _{20-Voleo} N ₁₂₀
T1 - P ₂₀ N ₀	T6 - P ₂₀ N ₄₀ S ₂₀
T2 - P ₂₀ N ₄₀	T7 - P ₂₀ N ₁₂₀ S ₂₀
T3 - P ₂₀ N ₈₀	T8 - P ₂₀ N ₁₂₀ S ₂₀ Zn _{0.4}
T4 - P _{20-Banda} N ₁₂₀	T9 - P ₂₀ N ₁₂₀ S ₂₀ Zn _{0.4} B _{0.15}

Tabla 2. Resultados del análisis del suelo del sitio experimental al momento de la siembra. Pergamino. Campaña 2012/13.

pH	MO	N total	P extractable Bray-1	N-Nitratos suelo 0-60 cm	S-Sulfatos suelo 0-20 cm	
Agua 1:2.5	----- %	-----	mg kg ⁻¹	kg ha ⁻¹	mg kg ⁻¹	
----- 5.8 -----	2.53	0.125	6.6	50.1	5.7	
Mg	K	Ca	Zn	Mn	Fe	B
----- mg kg ⁻¹ -----						
225	579	1423	0.45	42.3	69.1	0.43

Materiales y métodos

Ensayo Pergamino 2012

En la campaña 2012/13 se realizó un experimento de campo en la localidad de Pergamino, sobre un suelo Argiudol típico de alta productividad, serie Pergamino. El sitio experimental registra una rotación agrícola continua, siendo el antecesor la secuencia trigo/soja de segunda. La siembra de sorgo se efectuó el 17 de octubre bajo siembra directa. El cultivar sembrado fue Advanta VDH 314.

El diseño del ensayo correspondió a bloques completos al azar con cuatro repeticiones y diez tratamientos de fertilización (**Tabla 1**). A la siembra del cultivo, se realizó un muestreo del suelo para análisis cuyos resultados se muestran en la **Tabla 2**. El nivel de N-nitratos a 0-60 cm fue medio a bajo, el de P Bray resultó bajo, así como también resultaron bajos los niveles de el S-sulfatos, Zn y B, por tanto se esperaba observar respuestas al agregado de estos cinco nutrientes.

En el estadio V6 (6 hojas desarrolladas) se cuantificó la materia seca acumulada en planta entera. En la floración del cultivo se midió el número de hojas fotosintéticamente activas, la altura final de plantas, y el vigor e índice verde por el clorofilómetro Minolta Spad 502. A la cosecha se determinó el rendimiento y sus componentes: número (NG) y peso (PG) de los granos. La cosecha se realizó en forma manual, con trilla estacionaria de las muestras. Para el estudio de los resultados se realizaron análisis de la varianza y comparaciones de medias por el método LSD.

Las precipitaciones registradas durante el ciclo de cultivo fueron adecuadas, con un leve faltante a finales de enero cuando la ausencia de lluvias y altas temperaturas provocaron un agotamiento de las reservas (**Figura 1**). Las condiciones de luminosidad fueron apropiadas y, si bien acontecieron varios días de lluvia, esta circunstancia moderó las temperaturas, originando un cociente fototermal (Q) medio de 1.9.

Integración con experiencias anteriores y comparación de respuestas con maíz

Con la finalidad de ajustar curvas de respuesta a dosis crecientes de N y comparar las respuesta a N en sorgo con las observadas en maíz, se sumaron al análisis los resultados obtenidos en ensayos realizados con sorgo y maíz en General Villegas, Campaña 2010; 9 de

¹ UCT Agrícola. INTA EEA Pergamino. Correo electrónico: nferraris@pergamino.inta.gov.ar

² INTA EEA General Villegas.

³ INTA UEEA 9 de Julio.

Julio, Campaña 2010; y Pergamino, Campaña 2011; y con maíz en Pergamino, Campaña 2012 (datos no presentados).

Resultados y discusión

Ensayo Pergamino 2012

Los tratamientos de fertilización mejoraron diversos parámetros relacionados con el crecimiento como la acumulación inicial de materia seca, altura de planta y de hoja terminal, número de hojas verdes, vigor de planta e intensidad de verde (**Tabla 3**). Estas variables mostraron una fuerte correlación con los rendimientos. Se determinaron diferencias estadísticamente significativas entre los rendimientos de diferentes tratamientos

($P=0.001$; $cv\ 10.2\%$). El cultivo expresó respuesta a N con efecto significativo de la dosis con respecto al Testigo (**Figura 2**), confirmando una tendencia regional (Ferraris et al., 2012a) (**Figura 3**).

Las diferencias entre la misma dosis de P en banda y al voleo ($T4 - P_{20-Banda} N_{120} - vs\ T5 - P_{20-Voleo} N_{120}$) no fueron significativas, pero la diferencia neta, de $880\ kg\ ha^{-1}$ a favor del tratamiento en banda, fue agrónomicamente relevante (**Figura 2**). El sitio experimental ocupa una posición elevada en el paisaje y bajo intensas precipitaciones como las observadas durante la primavera de 2012 sufre severos procesos erosivos. La erosión causada por las lluvias podría haber retirado parte del P aplicado en forma

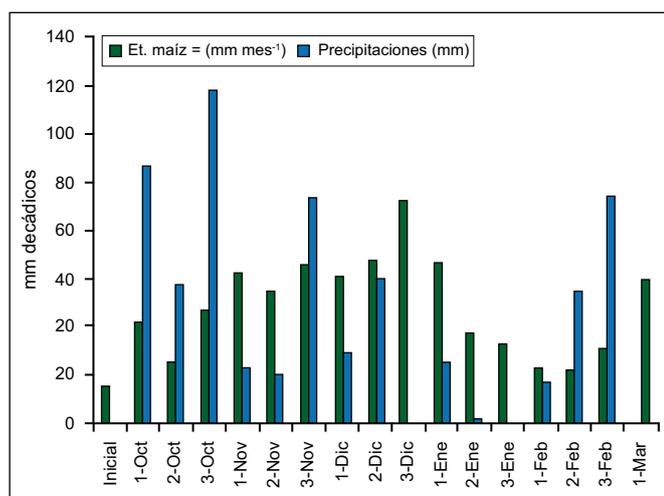


Figura 1. Precipitaciones y evapotranspiración decádicas acumuladas (mm) en Pergamino durante la campaña 2012/13. Agua disponible inicial en el suelo (200 cm) = 213 mm; Precipitaciones totales en el ciclo = 775 mm; Déficit acumulado de evapotranspiración = 16 mm.

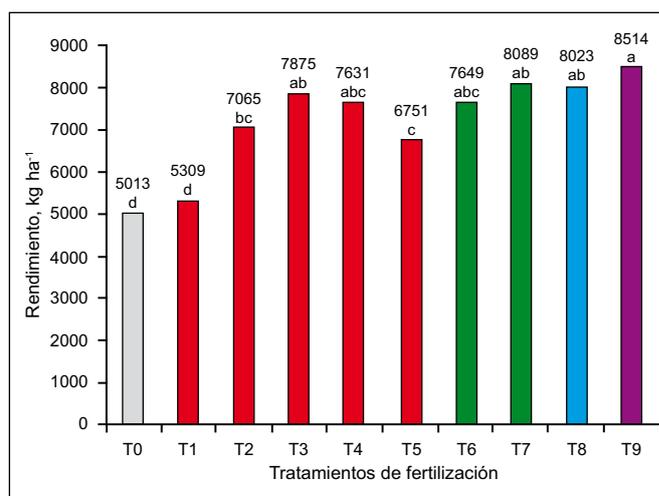


Figura 2. Producción de sorgo según tratamientos de fertilización (ver Tabla 1). Letras distintas sobre las columnas representan diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos. Pergamino. Campaña 2012/13.

Tabla 3. Parámetros morfológicos de cultivo durante el periodo crítico: Materia seca inicial, hojas fotosintéticamente activas, altura de planta, altura de hoja bandera, índice de vigor e intensidad de verde (Unidades Spad). Para los tratamientos para el estudio Pergamino 2012. Índice de Vigor: 1 mínimo 5 máximo; E2: collar de 5^{ta} hoja visible; E6: floración según la escala de Vanderlip y Reeves (1972). R²: coeficiente de determinación estadístico de cada variables con el rendimiento. Ensayo Pergamino, Campaña 2012/13.

Tratamientos	Materia seca E2 kg ha ⁻¹	Hojas activas E6	Altura planta cm	Altura hoja bandera cm	Índice de vigor E6	Unidades Spad R2
T0 - P ₀ N ₀	1205	7.0	120.0	95.0	2.0	42.5
T1 - P ₂₀ N ₀	1405	7.3	137.5	92.5	2.5	47.0
T2 - P ₂₀ N ₄₀	1490	8.0	147.5	115.0	2.6	50.0
T3 - P ₂₀ N ₈₀	1530	7.9	155.0	115.0	3.0	49.3
T4 - P _{20-Banda} N ₁₂₀	1305	8.3	155.0	115.0	3.1	47.1
T5 - P _{20-Voleo} N ₁₂₀	1550	8.0	150.0	110.0	2.6	45.9
T6 - P ₂₀ N ₄₀ S ₂₀	1580	7.9	150.0	110.0	2.9	47.7
T7 - P ₂₀ N ₁₂₀ S ₂₀	1515	9.0	160.0	120.0	3.7	50.2
T8 - P ₂₀ N ₁₂₀ S ₂₀ Zn _{0.4}	1395	8.3	158.0	121.0	3.5	50.0
T9 - P ₂₀ N ₁₂₀ S ₂₀ Zn _{0.4} B _{0.15}	1550	8.5	150.0	115.0	3.4	45.2
R ² vs rendimiento	0.34	0.76	0.78	0.85	0.77	0.31

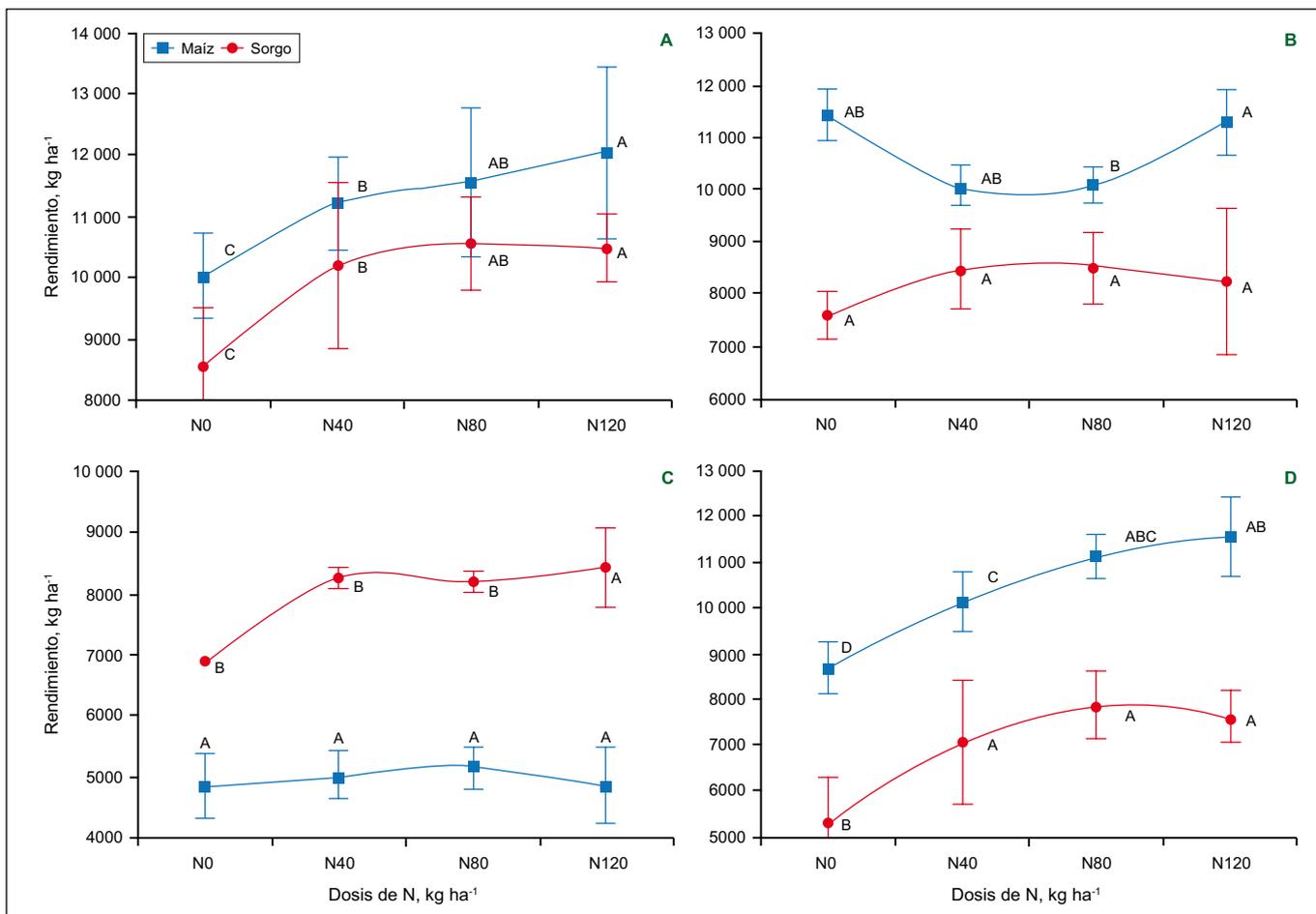


Figura 3. Rendimientos de maíz (kg ha^{-1}) (líneas azules) y sorgo (líneas rojas) según tratamientos de fertilización nitrogenada en A) General Villegas, Campaña 2010; B) 9 de Julio, Campaña 2010; C) Pergamino, Campaña 2011 (ambiente seco); y D) Pergamino, Campaña 2012. Dentro de cada sitio, letras distintas representan diferencias significativas en los rendimientos. Las barras de error indican la desviación estándar de la media.

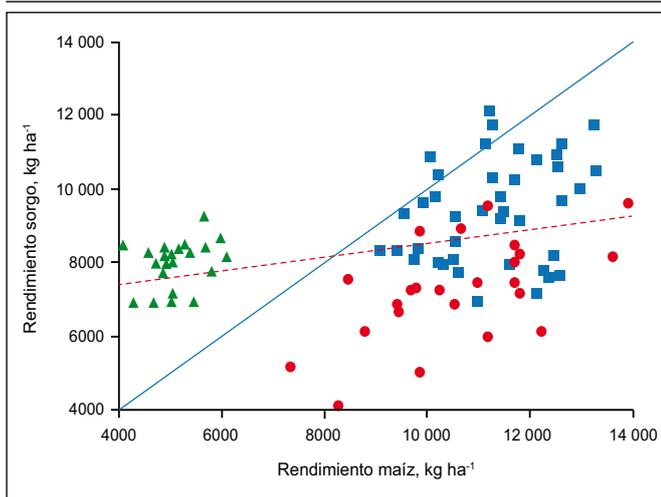


Figura 4. Relación entre los rendimientos de sorgo y maíz, en cuatro experimentos de fertilización conducidos en forma apareada. En verde rendimientos del sitio seco Pergamino 2011, en azul sitios medios 9 de Julio y General Villegas en 2010, y en rojo sitio húmedo Pergamino 2012. La línea azul indica la relación 1:1.

superficial, como sugiere Quintero (2013). Las diferencias por agregado de S fueron de 583 kg ha^{-1} (N_{40}) y de 459 kg ha^{-1} (N_{120}), y por el agregado de B ($T8 - P_{20} N_{120} S_{20} Zn_{0.4}$ - vs $T9 - P_{20} N_{120} S_{20} Zn_{0.4} B_{0.15}$ -) de 491 kg ha^{-1} , pero en ningún caso fueron significativas. Por el contrario, no se verificó

respuesta a Zn (Figura 2), lo cual había sido determinado en un experimento anterior por Ferraris et al. (2012b).

Integración con experiencias anteriores y comparación de respuestas con maíz

Bajo ambientes favorables como 9 de Julio 2010 (Figura 3A) o Pergamino 2012 (Figura 3D), el maíz incrementó sus rendimientos hasta niveles superiores de N, pero el sorgo mostró una respuesta estable al menos hasta la dosis más baja de N en todos los experimentos, aun con situaciones productivas desfavorables como la de Pergamino 2011 (Figura 3C).

Con los datos provenientes del experimento Pergamino 2012 y de los ensayos 9 de Julio 2010, General Villegas 2010 y Pergamino 2011, cuyos rendimientos fueron analizados por Ferraris et al. (2012a), se compararon los rendimientos según el ambiente de producción (Figura 4), y se estableció la relación entre rendimiento y N disponible (suelo 0-60 cm + fertilizante) para sorgo y maíz (Figura 5).

La relación entre los rendimientos de sorgo y maíz, se mantuvo alejada de la bisectriz 1:1 (Figura 4). Bajo un ambiente seco (Pergamino 2011), el sorgo alcanzó rendimientos superiores. Por el contrario, en Pergamino 2012 la media de los rendimientos fue de $10\,587 \text{ kg ha}^{-1}$ en maíz y 7270 kg ha^{-1} en sorgo, evidenciando el

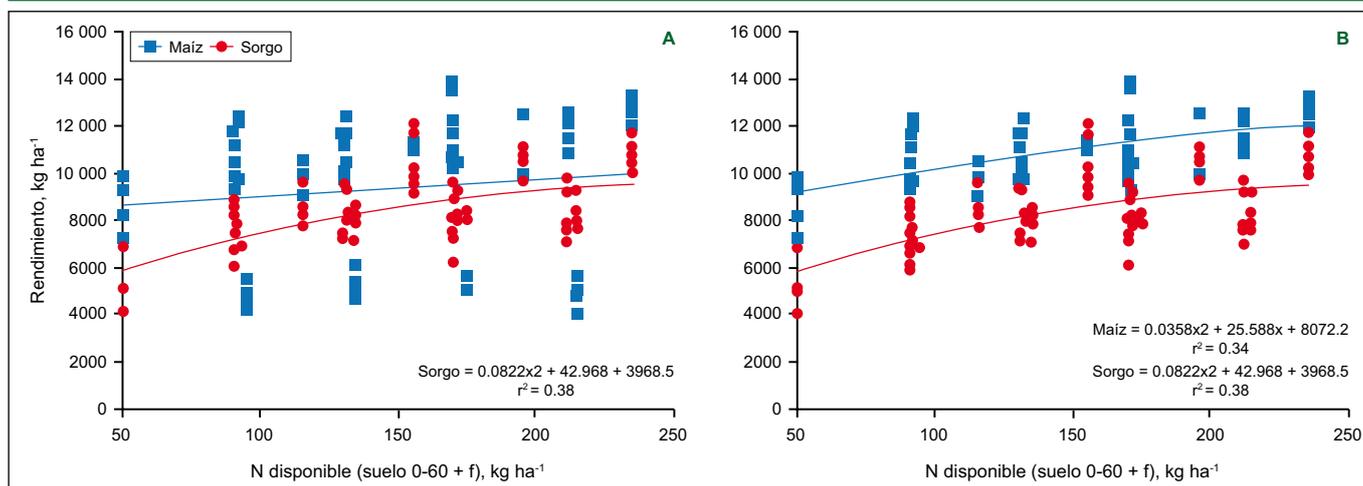


Figura 5. Relación entre los rendimientos de sorgo (rojo) y maíz (azul) en función de la disponibilidad de N (suelo + fertilizante) provenientes de 4 experimentos realizados en las localidades de General Villegas 2010, 9 de Julio 2010, Pergamino 2011 y Pergamino 2012. A) Ajuste completo y B) ajuste exceptuando el experimento de Pergamino 2011.

mayor potencial del maíz con precipitaciones favorables. Cuando el rendimiento superó los 8196 kg ha⁻¹, el maíz mostró habilidad competitiva superior respecto del sorgo (Figura 4).

La relación entre rendimiento y N disponible mostró escasa pendiente y ajuste en maíz por la baja respuesta observada en el sitio extremadamente seco de Pergamino 2011 (Figura 5A). Si se excluyen los datos de maíz de este sitio, ambas especies presentan similar tendencia pero superiores rendimientos en el maíz (Figura 5B). Por el contrario, el sorgo demostró una respuesta estable en todos los sitios (Figura 5). Considerando precios de urea de 600 USD t⁻¹, de sorgo de 130 USD t⁻¹ y de maíz de 150 USD t⁻¹, las relaciones de precios N/sorgo y N/maíz son de 11.3 y 9.4, respectivamente. Para estas relaciones de precios, los ajustes de respuesta a N indican que la disponibilidad óptima económica de N a la siembra sería de 193 y 226 kg N ha⁻¹ para sorgo y maíz, respectivamente.

Conclusiones

- El ciclo agrícola 2012/13 se caracterizó por las condiciones ambientales favorables para la expresión de buenos rendimientos en gramíneas estivales.
- Como es de esperar en una gramínea bajo un buen ambiente hídrico, se determinó respuesta a la aplicación de elementos de alta movilidad como N, y se observaron tendencias de interés para S y B. Por el contrario, no se verificó respuesta ni tendencia favorable a Zn. Finalmente, se observaron ventajas agronómicas por la aplicación de P en banda, aunque no significativas.
- Los resultados obtenidos permiten aceptar la hipótesis que sugiere al sorgo como un cultivo de elevado potencial de respuesta a la fertilización, siempre que se sorteen limitantes severas a la productividad que condicionan una buena expresión de rendimiento. No obstante, el umbral de estrés que limita la respuesta a N sería superior al de otros cultivos más sensibles como maíz.

Bibliografía

- De Battista, J.J., A.C. Alaluf, N.M. Arias, y M. Castellá. 2010. Efecto del nitrógeno sobre el crecimiento y rendimiento de sorgo granífero *Sorghum bicolor* (L.) Moench. En: Actas IX Congreso Nacional de Maíz y I Simposio Nacional de Sorgo, pp. 408-410. Rosario, Santa Fe, 17-19 de noviembre de 2010. AIANBA, Pergamino, Argentina.
- Ferrari, M., L.A. Rivoltella, L.A., y J.M. Casado. 2012. Diagnóstico de fertilidad y estrategias de fertilización nitrogenada en sorgo granífero. XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Comisión III. Fertilidad de Suelos y Nutrición Vegetal. AACS y SLCS. Mar del Plata, Abril 2012.
- Ferraris, G.N., M. Barraco, L. Ventimiglia, L. Couretot, G. Magnone, W. Miranda, C. Scianca, y F. Mousegne. 2012a. Rendimiento, respuesta a nitrógeno - azufre y eficiencia de uso de nutrientes en maíz y sorgo en el norte-centro-oeste de Buenos Aires. II Simposio Nacional de Sorgo. Un cultivo perfecto. Pergamino, 1 y 2 de Agosto de 2012.
- Ferraris, G.N., L. Couretot, G.G. Anta, y G. Magnone. 2012b. Tratamientos de semilla con microorganismos promotores de crecimiento (PGPM) y micronutrientes en sorgo *Sorghum bicolor* (Linn.). Efectos sobre el crecimiento y la productividad. II Simposio Nacional de Sorgo. Un cultivo perfecto. Pergamino, 1 y 2 de Agosto de 2012.
- Fontanetto, H., O. Keller, L. Belotti, C. Negro, y D. Giailevra. 2010. Efecto de diferentes combinaciones de nitrógeno y azufre sobre el cultivo de sorgo granífero (campana 2008/09). *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 46:21-23.
- Quintero, C. 2013. Manejo de nutrientes en Entre Ríos. pp. 118-124. En: Actas Simposio de Fertilidad 2013. "Nutrición de Cultivos para la Intensificación Productiva Sustentable. IPNI Cono Sur – Asociación Civil Fertilizar. Rosario, Mayo de 2013.
- Vanderlip, R. L. y H. E. Reeves. 1972. Growth stages of sorghum [*Sorghum bicolor*, (L.) Moench.]. *Agronomy Journal* 64:13-17.
- Zamora, M., A. Melin, y S. Balda. 2010. Fertilización con nitrógeno y azufre en sorgo granífero en el centro de Buenos Aires. En: Actas IX Congreso Nacional de Maíz y I Simposio Nacional de Sorgo, pp. 444-446. Rosario, Santa Fe, 17-19 de noviembre de 2010. AIANBA, Pergamino, Argentina. 🌱

Desarrollo de un índice de productividad de suelo regional a través de una red neuronal artificial

Josefina L. De Paepe¹ y Roberto Álvarez¹

Introducción

Se puede definir la productividad de un suelo como la capacidad del mismo de producir biomasa vegetal o semilla de cosecha (Yang et al., 2003). Por la relación causal entre las propiedades del suelo y el rendimiento de cultivos es importante entender y cuantificar dicha productividad (Sauerborn, 2002). Un índice de productividad representa la capacidad de producir cierta cantidad de biomasa por hectárea y por año, expresada como porcentaje respecto de la productividad óptima que proporcionaría un suelo ideal en su primer año de cultivo, o bajo determinado escenario de manejo.

Los índices de productividad pueden ser inductivos, cuando están basados únicamente en efectos inferidos de propiedades del suelo que se asume impactan el rendimiento de un cultivo, o deductivos, cuando están basados en métodos empíricos validados directamente con datos de rendimiento (Huddleston, 1984). En la Argentina, el índice de productividad de suelo comúnmente usado es el desarrollado por la FAO en 1970 (Riquier et al., 1970) y con el que se han categorizado los suelos en los mapas de suelo de INTA (GeoINTA, 2013). Este índice, que no se ha validado localmente con datos de rendimientos de cultivos, requiere información detallada de muchas variables edáficas, que se incorporan en un índice multiplicativo. De esta manera la variable que resulte menos favorable va a ser la que controla el valor final del índice. Para su aplicación se introdujeron modificaciones a fin de adecuarlo a las condiciones agroecológicas locales, además de una regionalización climática del país basada en registros históricos (Sobral y Nakama, 1988).

Se han desarrollado varios índices de productividad deductivos por ejemplo para maíz (*Zea Mays* L.) en Illinois,

EE.UU. (García-Paredes et al., 2000), para soja [*Glycine max* (L.) Merr.] en México (Yang et al., 2003) y para sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] en Australia (Potgieter et al., 2005). En la Región Pampeana se desarrolló un índice de productividad para trigo, con una red neuronal artificial (RNA) influenciado por las variables edáficas contenido de carbono orgánico (CO) y capacidad de almacenamiento de agua útil (CAAU) (Álvarez et al., 2011). Sin embargo, en este estudio se subdividió a la región en 10 unidades con lo cual la productividad pampeana estaba determinada por únicamente 10 valores. Este índice no permite definir adecuadamente las interacciones entre variables y no incluye variabilidad temporal, ya que se desarrolló con datos de una estrecha ventana temporal, pero su desarrollo mostró la utilidad de las RNA para generar índices de productividad.

Una RNA es un método empírico de modelización que comúnmente tiene mayor capacidad predictiva que un modelo de regresión porque permite describir procesos curvilíneos y exponer interacciones escondidas entre variables (Batchelor et al., 2002). Una RNA típica tiene una estructura de tres capas: entrada, escondida y salida (**Figura 1**). Cada neurona de la capa de entrada corresponde a una variable de entrada de información, la capa de salida tiene una neurona por cada variable a estimar y la estructura de la capa escondida se determina empíricamente. La información fluye desde la capa de entrada, a través de la capa escondida y finalmente hacia la capa de salida, y el proceso de aprendizaje se desarrolla al revés, ajustando los pesos asociados a las funciones de transferencia (líneas en el esquema) entre las capas en sentido inverso (Joergensen y Bendoricchio, 2001).

A escala mundial, la Región Pampeana es considerada una de las regiones productoras de granos más importantes por su extensión y potencial de rendimiento (Satorre y Slafer, 1999), pero no se han desarrollado en ella índices de productividad de suelos validados con datos de rendimiento para los principales cultivos. Nuestro objetivo fue comparar la performance del índice inductivo propuesto por la FAO usado por INTA con un índice deductivo basado en una RNA, como herramientas para evaluar la productividad de los suelos pampeanos.

Materiales y métodos

Generación de base de datos

En la actualidad más del 60% de la superficie de la Región Pampeana (ca. 60 Mha) se destina a la producción de cultivos en secano, principalmente en las porciones húmedas y semiáridas de la región sobre suelos bien drenados, generalmente Molisoles (Hall et al., 1992; MinAgri, 2013).

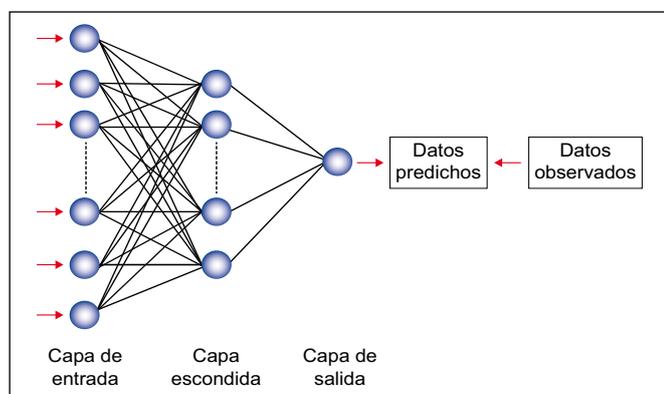


Figura 1. Representación de una red neuronal artificial mostrando capas de neuronas de entrada, escondida y salida, y las conexiones entre las mismas. Adaptado de Álvarez (2009).

¹ Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, CONICET. Correo electrónico: depaepe@agro.uba.ar

Para este estudio se utilizó información de más de 110 partidos de las provincias de Buenos Aires, Córdoba, Entre Ríos, La Pampa y Santa Fe que conforman el núcleo productivo de granos de la región, y se excluyeron los partidos correspondientes a la Pampa Deprimida, por la baja proporción de superficie cultivable. Para reducir el ruido estadístico generado por las grandes diferencias en superficies de los partidos, se agregó la información por partido a 41 unidades geográficas de 1 ± 0.5 Mha cada una, como se detalla en De Paepe y Álvarez (2013). Toda la información biofísica utilizada fue agregada a esta escala. Se generó así un set de 1640 combinaciones de suelo (41 unidades geográficas x año para el periodo de estudio 1967 a 2006).

Los datos de rendimiento de trigo fueron calculados a partir de información publicada de superficie sembrada y producción a escala de partido (MinAgri, 2013). Las características climáticas promedio por partido fueron estimadas a partir de la interpolación de datos de estaciones meteorológicas de INTA y el Servicio Meteorológico Nacional usando la metodología del inverso a la distancia (De Paepe y Álvarez, 2013).

La información de las variables edáficas textura, pH, y profundidad del suelo hasta la tosca fue estimada a partir de los más de 1000 perfiles de suelo publicados en los mapas de suelo de INTA a escala provincia como se detalla en De Paepe y Álvarez (2013). Se estimó, para cada variable, el valor medio afectando las propiedades del perfil por su área de influencia dentro de cada unidad cartográfica y, a su vez, el área de influencia de éstas en cada partido. La CAAU de los suelos se estimó utilizando las ecuaciones de Rawls et al. (1982). Como la información de los mapas de suelo de INTA tiene unos 30-50 años desde que fue

recabada, el contenido de CO de los partidos y unidades geográficas se tomó de un estudio reciente basado en un muestreo regional (Berhongaray et al., 2013).

Índice de productividad de la FAO

La información del índice de productividad de la FAO se encuentra disponible en los mapas de suelo publicados por INTA. A la Región Pampeana le corresponde el índice de productividad de la Región Chaco-Pampeana Sur I. Los parámetros incluidos son: condición climática, drenaje, profundidad efectiva, textura del horizonte superficial, salinidad, porcentaje de sodio intercambiable, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, etc. Se agregaron los datos a escala unidad geográfica a partir de la información publicada por unidad cartográfica tomando en cuenta la contribución relativa de cada valor relacionado a su área de influencia según se detalla en De Paepe y Álvarez (2013). Este índice varía entre 0 y 100, pero fue relativizado a 1.

Índice de productividad basado en una red neuronal artificial

Se aplicó la metodología de RNA para la explicación del rendimiento de trigo en la forma descrita en De Paepe y Álvarez (2013). Se buscó la máxima simplificación posible de las redes para generar el modelo más sencillo sin afectar el coeficiente de determinación (R^2). El set de datos se particionó en un 75% para generar el modelo y un 25% para realizar una validación independiente. El índice de productividad basado en esta metodología se generó asignando al máximo rendimiento estimado (combinación de suelo x año x clima) un valor de 1 y todos los otros rendimientos fueron relativizados a este valor.

Tabla 1. Variabilidad de factores climáticos, edáficos y el rendimiento de trigo en las 41 unidades geográficas de la Región Pampeana desde 1967 a 2006. Los valores mínimos y máximos fueron calculados para todo el set de datos. Adaptado de De Paepe y Álvarez (2013).

Variable	Unidad	Mínimo	Promedio \pm DE	Máximo
Precipitación durante barbecho	mm	21.3	161 \pm 77.8	555
Precipitación durante fase vegetativa	mm	11.6	113 \pm 57.0	379
Precipitación durante floración	mm	56.0	196 \pm 71.2	486
ETP durante barbecho	mm	73.9	130 \pm 13.7	175
ETP durante fase vegetativa	mm	77.8	134 \pm 14.4	191
ETP durante floración	mm	185	305 \pm 29.3	412
Coefficiente fototérmico ¹	MJ m ⁻² d ⁻¹ °C ⁻¹	0.93	1.37 \pm 0.22	2.05
Profundidad de suelo ²	cm	73	92.5 \pm 7.32	100
Arcilla ²	%	10.2	26.5 \pm 9.93	49.0
Arena ²	%	6.26	42.3 \pm 24.3	88.7
CAAU ²	mm	91.3	138 \pm 33.1	192
Carbono orgánico de suelo ³	t ha ⁻¹	31.0	64.5 \pm 17.4	109
Rendimiento de trigo	kg ha ⁻¹	448	1886 \pm 695	4519

ETP = evapotranspiración potencial, CAAU = Capacidad de almacenamiento de agua útil (0-100 cm).

¹ periodo crítico de un mes antes de anthesis, ² profundidad de 0-100 cm o límite superior de la capa petrocálcica, ³ 0-50 cm de profundidad.

Resultados

Se observó una gran variabilidad espacial en las condiciones de clima, suelo y en el rendimiento de trigo que a su vez se combinaron en una amplia variación temporal (**Tabla 1**). La precipitación fue la variable con la mayor variabilidad y el mismo patrón espacial se observó en la evapotranspiración potencial del cultivo. El coeficiente fototérmico decreció de sur a norte en función de la distribución de la temperatura. Los mayores contenidos de CO fueron observados en la Porción Este de la región con niveles hasta tres veces mayores que en el oeste Pampeano. Debido principalmente a diferencias texturales entre suelos, la CAAU varió mucho entre las subregiones pampeanas del este y oeste. El rendimiento de trigo aumentó un 56% desde 1967 a 2006 con un promedio de incremento anual de 37 kg ha⁻¹.

El índice de productividad de la FAO varió entre 0.33 y 0.89 y su relación con el rendimiento de trigo no fue ajustada (**Figura 2**). Si se considera la pendiente de esta relación, el aumento del valor del índice de 0.5 a 0.7 resulta en un aumento promedio de rendimiento de 250 kg ha⁻¹.

La RNA con el mejor ajuste tenía siete neuronas en la capa

oculta y las variables elegidas como inputs del modelo fueron: campaña, precipitación/ETP durante las fases de barbecho, fase vegetativa y floración, CO y CAAU (De Paepe y Álvarez, 2013). Los ajustes para el set de entrenamiento y el de validación no fueron diferentes significativamente ($R^2 = 0.611$ y $R^2 = 0.614$, respectivamente). Todas las variables climáticas y de suelo tenían un efecto curvilíneo sobre el rendimiento. Con el modelo de RNA se estimó un índice de productividad para trigo que varió de 0.54 a 1 y tuvo un buen ajuste con el rendimiento (**Figura 3**).

El modelo ajustado con la RNA fue utilizado para explorar los efectos de variables ambientales sobre el índice de productividad. Se observó que la CAAU tiene un impacto mayor sobre la productividad de suelos pampeanos bajo escenarios climáticos semiáridos que húmedos, y que este efecto disminuye cuando la situación climática mejora, hacia el Este Pampeano (**Figura 4A**). Además, se demostró que la productividad se encuentra determinada por la interacción positiva entre las variables edáficas CO y CAAU (**Figura 4B**). La productividad máxima se observó en suelos con 70 t CO ha⁻¹ y una CAAU 140 mm. Este índice de productividad no pudo ser validado con datos de rendimiento de ensayos experimentales (datos no mostrados).

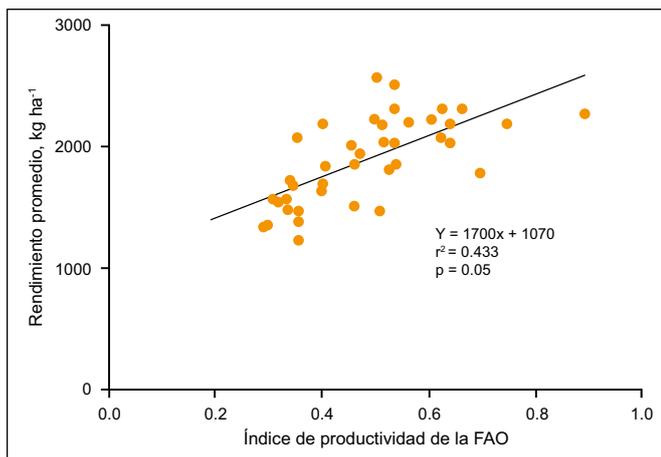


Figura 2. Relación entre el índice de productividad de suelo desarrollado por la FAO y el rendimiento promedio de trigo desde 1967 hasta 2006 por unidad geográfica. Redibujado de De Paepe y Álvarez (2013).

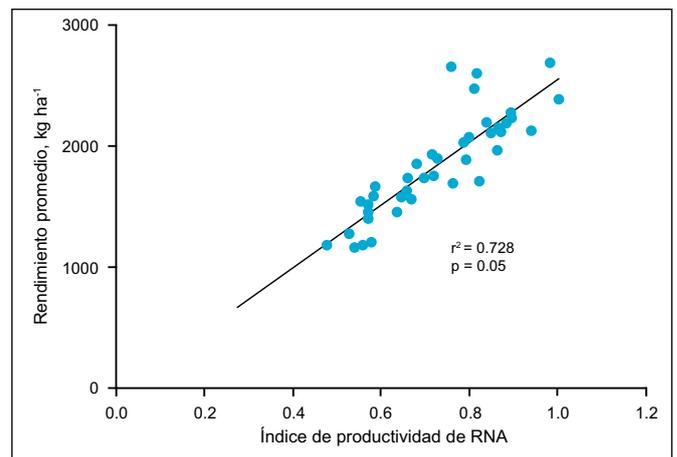


Figura 3. Relación entre el índice de productividad desarrollado aplicando la metodología de RNA y el rendimiento promedio de trigo desde 1967 hasta 2006 por unidad geográfica. Redibujado de De Paepe y Álvarez (2013).

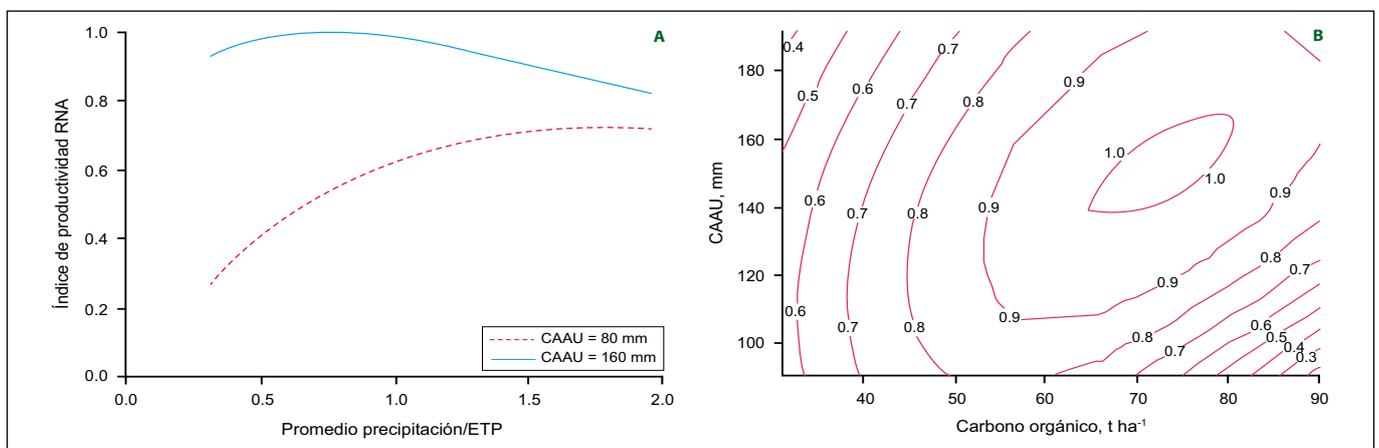


Figura 4. (A) Relación entre el índice de productividad basado en la RNA para el rango promedio observado de precipitación/ETP (evapotranspiración) bajo dos escenarios de suelo. La Porción Húmeda Pampeana se encuentra representada por una CAAU (capacidad de almacenamiento de agua útil) promedio de 160 mm y a la Porción Semiárida le corresponde una CAAU de 80 mm. (B) Interacción entre las variables CO y CAAU seleccionados por el modelo regional y el índice de productividad de trigo resultante. Redibujado de De Paepe y Álvarez (2013).

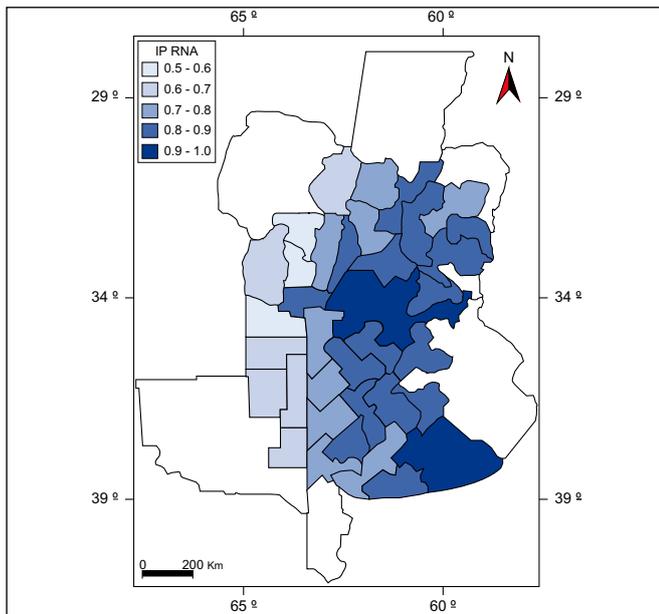


Figura 5. Distribución espacial del índice de productividad deductivo basado en una RNA por unidad geográfica. Los colores oscuros corresponden a valores del índice más altos y los más claros a valores menores. IP RNA: índice de productividad generado con una red neuronal artificial. Redibujado de De Paepe y Álvarez (2013).

La distribución espacial del índice de productividad muestra que los suelos con productividad más alta se ubican en el Este Pampeano y aquellos con la productividad más baja en el oeste semiárido (Figura 5). El 17% de las unidades geográficas obtuvieron un valor de > 0.9, el 60% tenían valores entre 0.7-0.9 y el 23% restante obtuvo valores menores a 0.7.

Discusión

Nuestros resultados muestran que el índice de productividad inductivo de la FAO aplicado comúnmente en la región pampeana para la evaluación de suelos no fue una herramienta útil para representar la productividad regional de trigo. A través de una RNA se logró estimar de manera óptima el rendimiento de trigo a escala regional utilizando información fácilmente obtenible y para un rango ambiental amplio. Con este modelo empírico se pudo generar un índice de productividad de trigo para la región. Cuando se analizaron las Porciones Húmedas y Semiáridas por separado se mantuvo la interacción positiva entre las variables edáficas CO y CAAU pero con más peso en la región semiárida pampeana. La importancia de estas variables edáficas sobre el rendimiento de cultivos ya ha sido demostrado previamente en otras regiones de producción del mundo y también en la región pampeana (Bono et al., 2008; Álvarez et al., 2002). Los resultados no esperados en suelos de textura fina que resultan en índices de productividad bajos pueden estar vinculados a problemas de enfermedades del cultivo (Annone, 2001), y problemas de encharcamiento temporal.

Los principios de la metodología de la RNA aplicada en este estudio pueden ser utilizados como una herramienta de la estimación de la productividad regional para otras regiones del mundo y para diferentes cultivos.

Bibliografía

- Álvarez R., y J.L. De Paepe. 2011. Establishing productivity indices for wheat in the Argentine Pampas by an artificial neural network approach. En *Artificial Neural Networks*. Nova Science Publishers.
- Álvarez, R. 2009. Predicting average regional yield and production of wheat in the Argentine Pampas by an artificial neural network approach. *Eur. J. Agron.* 30:70–77.
- Álvarez, R., C.R. Álvarez, y H. Steinbach. 2002. Association between soil organic matter and wheat yield in humid Pampa of Argentina. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33:749–757.
- Annone, J.G. 2001. Criterios empleados para la toma de decisiones en el uso de fungicidas en trigo. *Rev. Tecnol. Agropec.* 6:16–20.
- Batchelor, W.D., B. Basso, y J.O. Paz. 2002. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. *Eur. J. Agron.* 18:141–158.
- 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.
- Bono A, R. Álvarez, D.E. Buschiazzi y R.J.C. Cantet. 2008. Tillage Effects on Soil Carbon Balance in a Semiarid Agroecosystem. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72:1140–1149.
- De Paepe J.L. y R. Álvarez. 2013. Development of a Regional Soil Productivity Index Using an Artificial Neural Network Approach. *Agron. J.* 105:1803–1813.
- García-Paredes, J. D., K.R. Olson y J.M. Lang. 2000. Predicting corn and soybean productivity for Illinois soils. *Agricultural Systems* 64:151-170.
- GeoINTA. 2013. Consulta on-line: www.geointa.intagov.ar/suelos
- Hall, A.J., C. Rebella, C. Guersa, y J. Culot. 1992. Field-crop systems of the Pampas. In: C.J. Pearson, editor, *Field crop ecosystems*. Elsevier, Amsterdam.
- Huddleston, J.H. 1984. Development and use of soil productivity ratings in the United States. *Geoderma* 32:297–317.
- Jorgensen, S., y G. Bendricchio. 2001. *Fundamentals of ecological modelling*. 3rd ed. Elsevier, Amsterdam.
- MinAgri. 2013. Consulta on-line: www.minagri.gov.ar
- Potgieter, A.B., G.L. Hammer, A. Doherty, y P. de Voil. 2005. A simple regional scale model for forecasting sorghum yield across north-eastern Australia. *Agric. For. Meteorol.* 132:143–153.
- Rawls, W., D. Brakensiek, y K. Saxton. 1982. Estimation of soil water properties. *Trans. ASAE* 25:1316–1332.
- Riquier, J., D. Bramaio, y J. Cornet. 1970. A new system of soil appraisal in terms of actual and potential productivity. *FAO, Rome*.
- Satorre, E., y G. Slafer. 1999. Wheat production systems of the Pampas. In: E. Satorre and G. Slafer, editors, *Wheat: Ecology and physiology of yield determination*. Hayworth Press, Binghamton, NY. pp. 333–348.
- Sauerborn, J. 2002. Site productivity, the Key to crop productivity. *J. Agronomy & Crop Science* 188:363-367.
- Sobral, R. E. y V. Nakama. 1988. Índices de productividad, método paramétrico para evaluación de tierras. *Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo XII: del 12 al 16 de septiembre. Comisión mineralogía, génesis, clasificación y cartografía de suelos.*: 259 p.
- Yang, J., R. Hammer, A. Iomponi, y R. Planchar. 2003. Predicting soybean yield in a dry and wet year using a soil productivity index. *Plant Soil* 250:175–182. 🌱

Reporte de Investigación Reciente

LA MOVILIDAD DEL MAGNESIO EN EL SUELO COMO UN RETO PARA EL ANÁLISIS DE SUELOS Y DE PLANTAS, PARA LA FERTILIZACIÓN MAGNÉSICA Y PARA LA ABSORCIÓN POR LA RAÍZ EN CONDICIONES ADVERSAS DE CRECIMIENTO

Gransee, A. and H. Fühns. 2013. *Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. Plant and Soil* 368(1-2):5-21. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-012-1567-y>

Debido a su química particular, el magnesio (Mg) está sujeto a diversos procesos de transporte en los ecosistemas agrícolas. Esta elevada movilidad del Mg debe ser considerada en la nutrición de los cultivos en sistemas agrícolas sostenibles. Aunque se sabe sobre la movilidad del Mg en los suelos y las plantas, y sus consecuencias para la nutrición de los cultivos, recientes hallazgos sobre la absorción, transporte y fisiología del Mg, en particular bajo condiciones adversas de crecimiento, dan nuevas pistas sobre la importancia del Mg en la producción de cultivos. *Enfoque*, el objetivo de esta revisión es combinar el conocimiento sobre el origen y la movilidad del Mg en los suelos, con el papel del Mg en la fisiología del estrés de la planta y las evidencias recientes sobre los principios de la absorción de Mg por el cultivo. La pregunta finalmente sería: el progreso en la investigación sobre el Mg, en particular sobre su papel en la fisiología del estrés, hace necesaria una revisión del proceso para la elaboración de recomendaciones de fertilización de Mg. *Conclusiones*, nuevos conocimientos sobre la absorción y utilización del Mg, pero particularmente sobre el papel del Mg en el aumento de la tolerancia del cultivo a diversos estreses, indican cambios en la demanda de Mg por el cultivo en condiciones de crecimiento adversas. El trabajo futuro debe incorporar estos hallazgos en la optimización de los programas de fertilización balanceada y específica del sitio, en particular bajo condiciones de estrés. 🌱

FERTILIZACIÓN SILÍCA DE SUELOS TROPICALES: DISPONIBILIDAD DE SILICIO E ÍNDICE DE RECUPERACIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Camargo, M.S.d., G. Rocha and G.H. Korndörfer. 2013. *Silicate fertilization of tropical soils: silicon availability and recovery index of sugarcane. Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 37:1267-1275. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000500016>

La caña de azúcar es considerada una planta acumuladora de silicio (Si), pero en Brasil, donde se utilizan varios tipos de suelos para el cultivo, hay poca información sobre la fertilización del Si. Los objetivos de este estudio fueron la evaluación de la disponibilidad de Si, la captación y el índice de recuperación de Si del silicato aplicado en suelos tropicales con y sin fertilización de silicato, en tres cosechas. Los experimentos en macetas (100 L) se realizaron con dosis específicas de Si (0, 185, 370 y 555 kg ha⁻¹ Si), en tres suelos (*Quartzipsamment-Q*, 6% de arcilla; *Rhodic Hapludox-RH*, 22% de arcilla y *Rhodic Acrudox-RA*, 68% de arcilla), con cuatro repeticiones. La fuente de silicio fue silicato de Ca-Mg. Las mismas cantidades de Ca y Mg se aplicaron a todas las macetas, con cal y/o MgCl₂, cuando fue necesario. La caña se cosechó en la caña semilla y en la primera y segunda soca. Las dosis de silicio aumentaron la disponibilidad y la captación de Si por la caña de azúcar, y tuvieron un fuerte efecto residual. El contenido de Si soluble se redujo con la cosecha y aumentó con la aplicación de silicato en el orden decreciente: Q>RH>RA.

Las dosis de silicato promovieron un aumento del Si soluble en ácido acético a la cosecha en todos los cultivos y en todos los suelos, con excepción de RA. Las cantidades de Si-CaCl₂ no fueron influenciadas por silicato en los ciclos de cosecha. La absorción de Si por la planta aumenta de acuerdo a las tasas de Si y fue mayor en RA en todas las cosechas. El índice de recuperación del Si aplicado (IR) de la caña de azúcar aumentó con el tiempo, y fue mayor en RA. 🌱

CÓMO AFECTAN EL FÓSFORO, POTASIO Y AZUFRE AL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS Y A LA FIJACIÓN BIOLÓGICA DEL NITRÓGENO EN LEGUMINOSAS CULTIVADAS Y DE PASTOREO? UN META-ANÁLISIS

Divito, G.A. and V.O. Sadras. 2014. "How do phosphorus, potassium and sulphur affect plant growth and biological nitrogen fixation in crop and pasture legumes? A meta-analysis." *Field Crops Research* 156(0):161-171. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429013003833>

A nivel mundial, las leguminosas se cultivan en aproximadamente 250 millones de hectáreas y fijan alrededor de 90 Tg de N₂ por año. Las plantas que participan en la fijación biológica de nitrógeno (FBN) son particularmente sensibles a deficiencias de fósforo (P), potasio (K) y azufre (S). Estos nutrientes pueden afectar directamente la FBN; a través de la modulación del crecimiento de rizobios, la formación de nódulos y su funcionamiento, o indirectamente al afectar el crecimiento de la planta huésped. Sin embargo, varios procesos y mecanismos no están claros. Hemos recopilado una base de datos (63 estudios) sobre los efectos de la deficiencia de P, K, y S en la masa aérea, en la masa y el número de los nódulos, en la actividad de la nitrogenasa (estimada por el ensayo de reducción de actividad del acetileno, ARA) y en la concentración de N, P, K y S en los brotes y nódulos. Nuestros objetivos fueron (1) comparar la sensibilidad relativa de estas variables a la deficiencia de nutrientes y (2) investigar los patrones específicos de respuesta a los nutrientes de las variables. Nuestro análisis cuantitativo confirma que ambos, el crecimiento de nódulos y su número, son más sensibles que la masa aérea en la respuesta a la deficiencia de P, K y S. Además, la actividad del nódulo disminuye más que la masa aérea o la de los nódulos, lo que indica una reducción en la productividad de los nódulos, que estaría probablemente relacionada con los efectos directos de estos nutrientes en los procesos fisiológicos y metabólicos de los nódulos. La concentración estable de N en los brotes, en comparación con la concentración de P, K y S indica una acumulación relativamente mayor de N, lo que coincide con el mecanismo propuesto de retroalimentación de N bajo un descenso de FBN en los sistemas deficientes en nutrientes. A pesar de algunas diferencias en nutrientes específicos, es decir, los nódulos de menor tamaño y mayor relación N/K con escasez de P y K respectivamente, los patrones de crecimiento, la actividad de los nódulos y la concentración de nutrientes fueron similares para los tres nutrientes P, K y S. Esto indica que un mecanismo único podría ser deprimente sobre la FBN (retroalimentación de N) en conjunción con los efectos directos de los nutrientes sobre la actividad del nódulo. La escasez de datos de concentración de N, K y S en los nódulos es un limitante importante para el análisis profundo de las deficiencias de los nutrientes. Las concentraciones críticas de P, K y S en los tejidos vegetales y en los nódulos son también una brecha importante. Se necesitan modelos que integren el efecto directo de los nutrientes en el crecimiento de nódulos y su actividad con el mecanismo de retroalimentación del N. 🌱

Cursos y Simposios

- 1. Jornada de Actualización Técnica a Campo "Red de nutrición" - CREA Sur de Santa Fe**

Organiza : CREA Sur de Santa Fe-IPNI-ASP
Lugar : Cordoba, Argentina
Fecha : Febrero, 25, 2014
Información : <http://lacs.ipni.net>
- 2. IV Jornadas Bonaerenses de Microbiología de Suelos**

Organiza : Facultad de Ciencias Agrarias,
UNMdP - INTA - AAM
Lugar : Balcarce, Buenos Aires, Argentina
Fecha : Marzo, 6-7, 2014
Información : contacto@jornadasmicrosuelos.org
<http://jornadasmicrosuelos.org>
- 3. XII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo**

Organiza : Universidad de Magallanes
Lugar : Universidad de Magallanes, Chile
Fecha : Abril, 1-4, 2014
Información : <http://www.schcs.cl/>
- 4. VI Simposio Regional IPNI Brasil sobre Buenas Prácticas para Uso Eficiente de Fertilizantes**

Organiza : IPNI, Brasil
Lugar : Dourados, MS, Brasil
Fecha : Abril, 15-16, 2014
Información : <http://brasil.ipni.net>
- 5. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo**

Organiza : AACCS
Lugar : Bahía Blanca, Buenos Aires,
Argentina
Fecha : Mayo, 5-9, 2014
Información : www.xxivcongresodesuelo.org.ar
- 6. Simposio Internacional sobre Mejores Prácticas de Manejo de Fertilizantes - IPNI Brasil y Cono Sur**

Organiza : IPNI - Brasil y Cono Sur
Lugar : Foz de Iguazú, Brasil
Fecha : Mayo, 20-21, 2014
Información : <http://lacs.ipni.net>
<http://brasil.ipni.net>
- 7. Conferencia Anual IFA**

Organiza : IFA
Lugar : Sydney, Australia
Fecha : Mayo, 26-28, 2014
Información : www.fertilizer.org
- 8. I Congreso Uruguayo de Suelos. VI Encuentro de la SUCS**

Organiza : SUCS
Lugar : Hotel Sheraton de Colonia del
Sacramento, Uruguay
Fecha : Agosto, 6-8, 2014
Información : <http://sucs.org.uy/>
- 9. XX Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo**

Organiza : IUSS
Lugar : Jeju, Corea
Fecha : Junio, 8-13, 2014
Información : www.iuss.org
- 10. Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo**

Organiza : SCCS
Lugar : Popayán - Cauca - Colombia
Fecha : Octubre, 8-11, 2014
Información : scsuelo@cable.net.co
<http://www.sccsuelo.org/>
- 11. II Simposio Internacional del Magnesio**

Organiza : IAPN
Lugar : Sao Paulo, Brasil
Fecha : Noviembre, 4-6, 2014
Información : mg-conference@iapn-goettingen.de
www.iapn.de
- 12. XX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del suelo**

Organiza : SLCS - SPCS
Lugar : Cuzco, Perú
Fecha : Noviembre, 9-15, 2014
Información : jalegre@lamolina.edu.pe
www.slcs.org.mx

Publicaciones Disponibles IPNI-Norte de Latinoamérica

Titulo de la Publicación	Costo (U\$S)
<p>Manual de Arroz. Desórdenes Nutricionales y Manejo de Nutrientes: Esta publicación contiene información que permite desarrollar estrategias de manejo nutricional y recomendaciones de fertilización del arroz cultivado en regiones tropicales y subtropicales.</p> <p>Guía Práctica para el Manejo de Nutrientes en Arroz: Contiene una discusión concisa y muy práctica de las estrategias de manejo nutricional y recomendaciones de fertilización del arroz cultivado en regiones tropicales y subtropicales. Excelente herramienta de apoyo en el contacto diario con los agricultores.</p>	45.00
<p>Palma de Aceite. Manejo para Rendimientos Altos y Sostenidos: La palma de aceite es uno de los cultivos con mayor expectativa de crecimiento a nivel mundial, existe una gran demanda entre los palmicultores y agrónomos por conocimientos y publicaciones sobre su manejo adecuado.</p>	45.00
<p>Guía de Campo, Serie en Palma Aceitera, Volumen 1: Vivero. Guía de campo preparada específicamente para uso práctico en el manejo diario de la palma aceitera. El volumen 1 cubre el manejo del vivero para producir plántas de calidad que deben estar disponibles para la siembra en el campo en el momento requerido.</p> <p>Guía de Campo, Serie en Palma Aceitera, Volumen 2: Fase Inmadura. Guía de campo preparada específicamente para uso práctico en el manejo diario de la palma aceitera. El volumen 2 cubre el manejo de la fase inmadura de la plantación para lograr una población uniforme de palmas productivas en cada bloque del campo.</p> <p>Guía de Campo, Serie en Palma Aceitera, Volumen 3: Fase Madura. Guía de campo preparada específicamente para uso práctico en el manejo diario de la palma aceitera. El volumen 3 cubre el manejo de la fase madura de la plantación para lograr rendimientos sostenidos de racimos de fruta fresca a través de toda la etapa productiva del cultivo.</p>	45.00
<p>Manual Internacional de Fertilidad de Suelos: Publicación didáctica sobre uso y manejo de suelos y fertilizantes con datos y ejemplos de diferentes partes del mundo</p>	15.00
<p>Uso Eficiente de Nutrientes: Esta publicación resume el estado del conocimiento con respecto a la eficiencia de uso de nutrientes en las Américas y discute el contexto contemporáneo dentro del cual se deben manejar los nutrientes.</p>	15.00
<p>Nutrición y Fertilización del Mango: Esta publicación ofrece información básica para el manejo de la nutrición y fertilización del mango tomando en cuenta las particulares características de desarrollo de este cultivo en el trópico.</p>	15.00
<p>Manual de Nutrición y Fertilización de Pastos: Esta publicación ofrece a las personas envueltas en la producción ganadera una visión amplia del potencial productivo, de los requerimientos nutricionales y de los factores limitantes impuestos por el ambiente tropical a la producción de forrajes.</p>	10.00
<p>Nutrición de la Caña de Azúcar: Este manual de campo es una guía completa para la identificación y corrección de los desórdenes y desbalances nutricionales de la caña de azúcar. El tratamiento completo de la materia y las excelentes ilustraciones hacen de este manual una importante herramienta de trabajo en la producción de caña.</p>	8.00
<p>Estadística en la Investigación del Uso de Fertilizantes: Publicación que presenta conceptos actuales de diseño experimental e interpretación estadística de los datos de investigación de campo en el uso de fertilizantes.</p>	6.00
<p>Vea el catálogo completo de publicaciones del IPNI en http://nla.ipni.net</p>	