Informaciones Agronómicas

de Hispanoamérica

IPNI International Plant Nutrition Institute

IAH 25 - Marzo 2017

En este número

- Agronomía basada en datos
- Indicadores de sustentabilidad
- Profundidad de muestreo para nitrato
- Efecto del riego en los suelos
- Absorción de nutrientes en lechuga

IAH 25 - Marzo 2017

Versión Cono Sur

Director: Dr. Fernando O. García
International Plant Nutrition Institute
Programa Cono Sur de Latinoamérica
Correo electrónico: fgarcia@ipni.net

Propietario:
International Plant Nutrition Institute (IPNI)
CUIT: 30-70175611-4
ISSN 2222-016X
No. de Registro de Propiedad Intelectual: 5307180

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
Peachtree Corners, Georgia 30092-2844 - EE.UU
Telf.: 1 770 825 8079 • Fax: 1 770 448 0439
Correo electrónico: atasistro@ipni.net
http://mca.ipni.net

Contenido

Agronomía basada en evidencia Reduciendo las brechas de datos en fertilidad de suelos y manejo de la nutrición de cultivos 3
Paul E. Fixen

Evaluación del impacto ambiental del manejo agrícola en tres sistemas agrícolas argentinos 9
Florencia Rositano, Federico E. Bert, Gervasio Piñeiro y Diego O. Ferraro

Profundidad de muestreo para el análisis de nitrato en suelos del sudoeste de Buenos Aires, Argentina 14
Josefina P. Zilio, Franco F. Frolla y Hugo R. Krüger

Evaluación de la calidad del agua y del suelo regado en forma complementaria en la región pampeana argentina 17
Martín Torres Duggan, Carina R. Álvarez, y Helena Rimski Korsakov

Curvas de acumulación de nitrógeno, fósforo y potasio en lechuga (*Lactuca sativa* L.) cv. Coolward cultivada en invernadero en México 23
Anacleto Sosa Baldivia, Guadalupe Ruíz Ibarra, Juliana Padilla Cuevas, Jorge D. Etchevers Barra, Javier Z. Castellanos Ramos, Raul Rene Robles de la Torre

Cursos y Simposios 29

Publicaciones Disponibles 29

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.

Misión del IPNI

La misión del IPNI es desarrollar y promover información científica sobre el manejo responsable de la nutrición de las plantas para el beneficio de la humanidad.

IPNI es una organización global con iniciativas enfocadas en la creciente necesidad mundial de alimentos, forrajes, combustibles, y fibras. Los programas de investigación y educación del IPNI desarrollan y promueven el Manejo Responsable de los Nutrientes a través de los 4 Requisitos (4R): aplicar la fuente y la dosis correcta en el momento y la forma correctos.

IPNI
INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE

http://www.ipni.net

Agronomía basada en evidencia
Reduciendo las brechas de datos en fertilidad de suelos y manejo de la nutrición de cultivos*

Paul E. Fixen

La agronomía basada en evidencia busca la integración transparente de toda la información relevante y las recomendaciones prácticas con las condiciones específicas de cada lugar. Tiene el potencial de hacer que la ciencia sirva de base para un manejo más rápido, ágil y creíble de la fertilidad del suelo y la nutrición de cultivos, y puede incrementar el impacto de la investigación en nutrientes en un mundo de "grandes datos".

La Visión Global

El desafío asociado con la producción sostenible y la seguridad alimentaria es inmenso. Una forma de describirlo es que necesitamos producir más alimentos en los próximos 50 años que en toda la historia humana (J. Hatfield, com. pers.). Este desafío agronómico está siendo intensificado por el cambio climático, la seguridad del agua y la degradación de los suelos... todos factores que indican que, en el futuro, las respuestas de prácticas e insumos en determinados sitios pueden no ser las mismas que en el pasado. Un artículo destacado en un número reciente de Newsweek dedicado a "El futuro de la agricultura" sostuvo que para alimentar a la humanidad necesitamos, hoy, las granjas del futuro (Isaacson, 2015).

Satisfacer este desafío será imposible sin aportes científicos sustanciales que apoyen, de manera sostenible, la seguridad alimentaria. Para ello, la ciencia necesita ser:

- **Rápida** – porque el tiempo para completer estos objetivos es reducido.
- **Ágil** – porque las condiciones futuras son inciertas.
- **Creíble** – para ser aceptada, apoyada, y adoptada en este mundo que contiene mucha información ruidosa.

Agronomía Basada en Evidencia en un Mundo de Grandes Datos

Entonces, ¿Cómo logramos una ciencia agronómica más rápida, ágil y creíble? Uno de los caminos más prometedores para lograrlo parece ser la **agronomía basada en evidencia que busca la integración transparente de todos los datos relevantes y las prácticas recomendadas resultantes con las condiciones de las unidades de producción locales y datos asociados**. Esto cambia el foco hacia "todos los datos", considerando no solamente los "grandes datos" que tantos titulares recientes han capturado, sino también a los "pequeños datos" del investigador individual que, cuando están en una forma útil y trazable, pueden convertirse en un sub-conjunto dinamizador del mundo de los "grandes datos".

En Science, Lazer y colaboradores sostienen: "En lugar de enfocarnos en una "revolución de los grandes datos ", tal vez es hora de enfocarnos en una "revolución de todos los datos", utilizando datos de todas las fuentes tradicionales y nuevas, y proveyendo una comprensión más profunda y clara de nuestro mundo" (Lazer et al., 2014). "Todos los datos" a los que se refieren incluye los datos surgidos de la investigación científica. Nuestro objetivo en la agronomía es la toma de decisiones inteligentes basadas en la ciencia, pero allí no es donde comienza el proceso. El proceso comienza con una base de datos utilizable **(Figura 1)** que, eventualmente, conduce a elecciones sensatas.

Dicha base de datos rara vez proviene de una sola fuente, lugar, institución o un mismo diseño de investigación. Más bien, es construida por una serie de contribuciones progresivas y la agregación de datos relevantes provenientes de todas las fuentes mencionadas. En las últimas décadas, la comprensión científica y la tecnología asociada con la preservación de datos, y procesos de síntesis y agregación han mejorado notablemente. Sin embargo, nuestras ciencias agronómicas no han aprovechado plenamente estos desarrollos. Se podría decir que para gran parte de la ciencia agronómica,

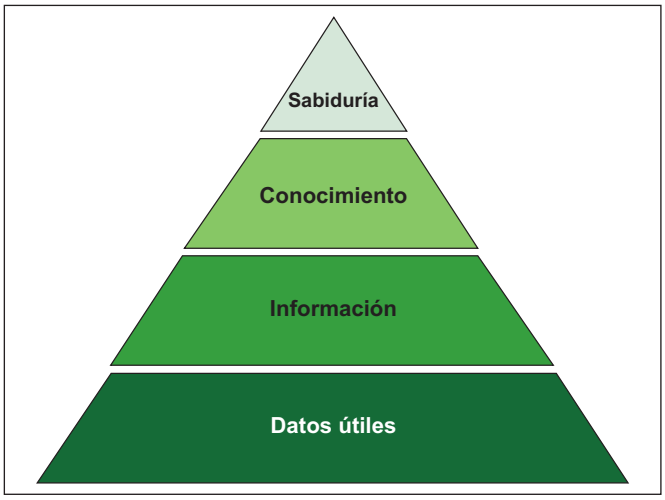

Figura 1. Desde los datos útiles hasta la sabiduría. Adaptado de Lockers y Janssen (2014).

* **Traducción de "Evidence-based agronomy: filling the gaps in soil fertility/nutrient management data", conferencia presentada en Great Plains Soil Fertility Conference. Marzo 1-2, 2016. Denver, Colorado, EE.UU.**
International Plant Nutrition Institute, Brookings, South Dakota, EE.UU.
Autor de contacto. Correo electrónico: pfixen@ipni.net

los avances en la "ciencia de los datos" a menudo han superado ampliamente los avances en los "datos de la ciencia". Irónicamente, la ciencia de los datos parece ser más comúnmente aplicada hoy en día en el mundo rico en datos de la agricultura de precisión a campo y por las industrias relacionadas, que en el mundo de la investigación científica. La agronomía basada en la evidencia aplica la ciencia de los datos a los datos de la ciencia agronómica.

Es informativo considerar el ciclo de vida típico de la investigación (**Figura 2A**; Michener, 2015) el cual puede ser simplificado en cuatro etapas principales:

1. Formular ideas e hipótesis.
2. Adquirir datos.
3. Analizar, observar e interpretar.
4. Publicar y diseminar descubrimientos (usualmente en forma narrativa).

Lo que es generalmente menospreciado es el "Ciclo de vida de los datos" subyacente a la etapa de adquisición de datos del "Ciclo de vida de la investigación" **(Figura 2B)** y sus ocho etapas tal como describe Michener (2015). Muy frecuentemente hoy en día en la investigación agronómica, algunas de estas etapas están débilmente presentes o completamente ausentes. Muy a menudo, las etapa 7 (preservación de los datos) y 8 (compartir los datos) no suceden. Estas etapas aún no son parte de la metodología estándar de procedimientos para la ciencia agronómica, aun cuando se puede argumentar que datos compartidos de alta calidad pueden representar la mayor contribución de la investigación y los descubrimientos científicos.

Por lo tanto, el manejo responsable de datos constituye el núcleo de la agronomía basada en evidencia. Crear y publicar bases de datos de alta calidad y comprobables es un objetivo importante, donde tales bases de datos se convierten en entidades citables, cada una con su propio DOI (*Digital Object Identifier*) y con capacidad para aumentar el número de veces que son citadas (Piwowar y Vision, 2013) con la consiguiente contribución a la seguridad y promoción en el trabajo. En el proceso, se evita la recolección de datos redundantes innecesarios y se permite la reutilización, la agregación y la colaboración de datos. Sobre la marcha, la mayor transparencia tiene el potencial de mejorar sustancialmente la credibilidad de la ciencia y de las evaluaciones y recomendaciones científicas en comparación con aquellas basadas en desinformación y verdades parciales.

En realidad, la gran mayoría de la ciencia agronómica publicada no está en forma de conjuntos de datos básicos, sino en forma narrativa con inserciones de resúmenes o visualizaciones de datos adquiridos. Por lo tanto, otro aspecto importante de la agronomía basada en la evidencia es la síntesis transparente, no sesgada, de la literatura, relevante, en algunos casos "gris", publicada. Las revisiones sistemáticas se han

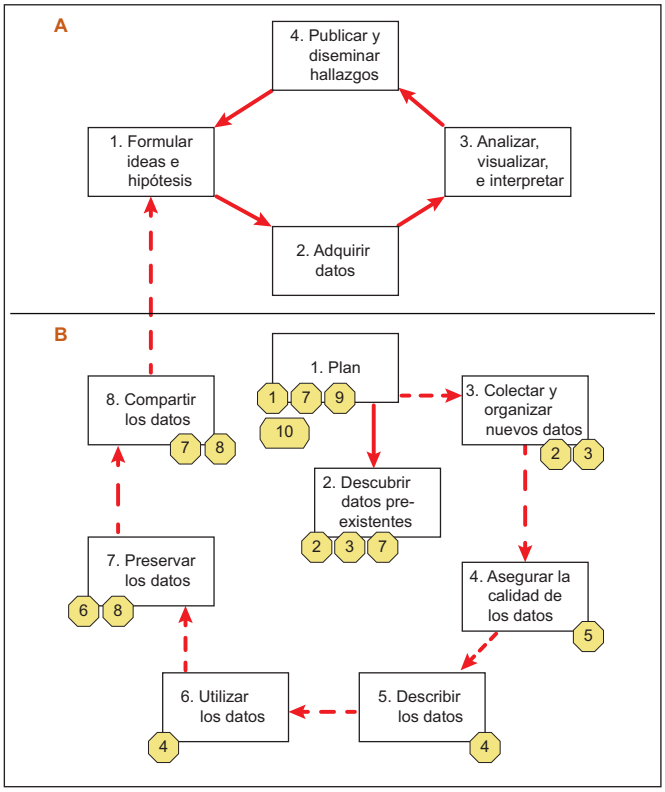

Figura 2. Ciclos de vida de la investigación (A) y de los datos (B). (Michener, 2015).

convertido en el estándar de calidad para dicha síntesis (CEE, 2013). Una revisión sistemática es una revisión muy estructurada donde los métodos de revisión reportados son lo suficientemente explícitos como para permitir que otros repitan la revisión y generen el mismo resultado. Usualmente involucran un equipo... idealmente en este caso, un agrónomo, un experto en metodología de revisiones y un bibliotecario. Las principales ventajas de las revisiones sistemáticas bien llevadas a cabo incluyen una disminución del riesgo de sesgo y una habilitación para realizar meta-análisis.

Un meta-análisis es un enfoque estadístico para combinar los resultados de múltiples estudios para mejorar las estimaciones de la magnitud de determinados efectos y la incertidumbre asociada con esas estimaciones. *Google Trends* muestra que las búsquedas para el término "revisión sistemática" han aumentado notablemente en la última década, lo que indica que estas revisiones están creciendo en influencia entre aquellos que buscan la síntesis de la comprensión científica contemporánea de un tema o pregunta. Las revisiones sistemáticas y los meta-análisis son herramientas importantes para la etapa de síntesis que conduzca a los productos de apoyo para la toma de decisiones agronómicas, pero tenemos trabajo que hacer antes de que dichas herramientas puedan alcanzar su potencial - más discusión sobre esto se presenta en la siguiente sección de manejo responsable de nutrientes.

Actualmente, muchos grupos trabajan para avanzar en el manejo responsable de datos y enfoques basados en evidencia. Estos grupos pueden ser un gran activo para ayudar a individuos u organizaciones a adoptar este tipo de enfoques. Una búsqueda en *Google* llevará

a una considerable cantidad de información y recursos proporcionados por cada uno. Algunos de estos grupos son:

- Research Data Alliance (RDA): los miembros incluyen individuos, organizaciones, y países; es gratis; cubre todo tipo de datos.
- Depósito de datos Dryad: un repositorio digital conservado; los miembros incluyen revistas, sociedades científicas, instituciones de investigación, bibliotecas; Integra las presentaciones a revistas y datos.
- CGIAR's Open Access and Open Data Inititative (OA/OD): lanzado en 2013, incluye los 15 centros de investigación; destinado a facilitar el cumplimiento de políticas de acceso abierto de las fuentes de financiación.
- Global Open Data for Agriculture and Nutrition (GODAN): un esfuerzo de alto nivel destinado a apoyar los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (SDGs por sus siglas en inglés).
- Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP): aborda la brecha de uso de datos con énfasis en modelos para el apoyo en la toma de decisiones basados en la ciencia y enfocados en la seguridad alimentaria.
- DataOne: proyecto financiado por la NSF comprometido con la participación de una comunidad amplia y diversa de usuarios, estudiantes y ciudadanos en la ciencia a través de esfuerzos que abarcan todo el ciclo de vida de los datos, a partir de la recopilación de los datos, su manejo, análisis y publicación.
- ASA-CSSA-SSSA: recientemente se estableció un Comité de Manejo Responsable de Datos para ayudar a definir el rol de las tres sociedades en las cuestiones relacionadas a los datos; cada vez más sus revistas están aceptando documentos sobre datos; La cantidad de revisiones sistemáticas está incrementando, al igual que el entrenamiento en el manejo de datos, los meta-análisis y las revisiones.

Como un ejemplo de la actividad de la ASA-CSSA-SSSA en la agronomía basada en evidencia, en la reunión anual 2015 en Minneapolis, se llevaron a cabo los siguientes simposios y talleres (presentaciones disponibles en: https://www.acsmeetings.org).

- Meta-análisis para condiciones de pequeños productores.
- AgMIP y Socios.
- ¿Cuáles son los costos/limitaciones asociados con el intercambio de datos?.
- Meta-análisis en la investigación agrícola.
- Yendo de los grandes datos a las decisiones agronómicas.
- Bases de datos de mejoramiento genético de cultivos.
- Beneficios y barreras para el intercambio de datos.
- Taller "Meta-análisis para la síntesis de evidencia en agricultura".
- Taller "Manejo de datos y trucos de análisis que no te enseñan en el posgrado".

Además, se celebró una sesión plenaria de las cuatro sociedades (*ASA-CSSA-SSSA* junto con la *Entomological Society of America*) titulada "*Obteniendo más de los datos - Ciencia para soluciones sostenibles*" que contó con oradores internacionalmente reconocidos. Este plenario demostró un desafío a estas sociedades en relación con los enfoques basados en la evidencia. Hubo 7200 asistentes reunidos por las cuatro sociedades, pero menos de 300 asistieron a esta reunión – este tema aún no está en el primer plano para muchos miembros de las Sociedades. Aunque muchos individuos o grupos enfocados en un tema de investigación de interés específico la ven como una actividad de fortalecimiento y "cocinándose", en este mundo de constante competencia por el tiempo y la atención, rara vez parece pasar al primer plano donde obtenga la atención necesaria para que se produzca la adopción.

La agronomía no es ciertamente la primera disciplina o industria que cobra consciencia del valor de los enfoques basados en la evidencia y tenemos mucho que aprender de aquellas disciplinas que están muy por delante de nosotros. Una de estas disciplinas es la medicina clínica. La *Cochrane Collaborative* fue lanzada en 1993 en un Coloquio en Oxford, Inglaterra, con 70 participantes de nueve países. Hoy en día, tiene 37 000 contribuyentes activos en 130 países y ha completado y puesto a disposición en su sitio web más de 6600 revisiones sistemáticas que abordan cuestiones críticas para los profesionales de la salud en ambientes clínicos. Es una historia notable de éxito, que podría ser reproducida en la agronomía.

Manejo responsable de nutrientes basado en evidencia

Entonces, ¿dónde estamos en la fertilidad de suelos y el manejo responsable de nutrientes en cuanto al manejo de datos y la agronomía basada en evidencia? ¿Es relevante? ¿Hay oportunidad para su adopción?

Comencemos por evaluar la naturaleza de nuestra disciplina y cómo se aplica en el campo. Aunque contamos con mecanismos científicos bien desarrollados en relación con los nutrientes en los suelos, los sistemas de cultivo y los agro-ecosistemas (Barber, 1995), somos, en la práctica, más empíricos que mecanicistas. Nuestro paradigma para el éxito es medir, generar datos, y reaccionar a los datos recolectados, ya sea en un campo entero o con la mayor resolución espacial de los sistemas de precisión. Nuestras recomendaciones, ya sea a través de un sistema estático basado en análisis de suelos, guiados casi en tiempo real por modelos de simulación basados en el clima, o mediante sensores

activos dinámicos, están todas basadas en conjuntos de datos de calibración. El éxito de lo que sucede en el campo y el valor de lo que se produce desde el campo, se definen cada vez más cuantitativamente. De hecho, dependemos en gran medida de los datos. Es difícil imaginar un campo basado en la ciencia más dependiente de los datos que el de la fertilidad del suelo y el manejo responsable de nutrientes, tanto en su generación como en la aplicación de su ciencia.

Aunque como una disciplina, la fertilidad del suelo es realmente impulsada por los datos, tradicionalmente ha sido difícil conectar los datos con las recomendaciones de una manera abierta y transparente. Hice esta observación en 1992 y me referí a ella como el paradigma de la caja negra (**Figura 3**; Fixen, 1992). Los datos están en la caja, pero con muchos otros factores que se integran para generar una dosis o práctica recomendada específica. Esto puede resultar en confusión para el usuario final y otros científicos que pueden tener datos adicionales relevantes para la práctica. No es una aplicación de agronomía basada en evidencia.

Durante varios años, el IPNI (entonces llamado PPI Potash & Phosphate Institute) tenía una herramienta para la toma de decisiones llamada PKMAN (PPI, 1994), que usaba datos de calibración como insumo para el programa y mostraba claramente todas las suposiciones hechas al conectar los datos con la recomendación, siendo la mayoría fijadas por el usuario. Un problema importante para la aceptación de esta herramienta fue el acceso a los datos de calibración.

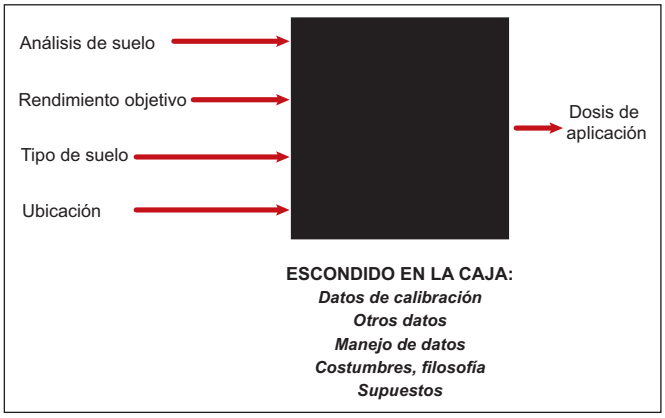

Figura 3. Un paradigma tradicional de recomendación de fertilización (Fixen, 1992).

El acceso abierto a datos de alta calidad de calibración de fertilización o análisis de suelos puede conducir a herramientas y sistemas para la toma de decisiones muy eficaces que pueden ser fácilmente actualizados a medida que se disponga de nuevos datos o se planteen nuevas preguntas relacionadas con el manejo de nutrientes. Un ejemplo es la plataforma "*Mejores Decisiones de Fertilizantes para Sistemas de Cultivo*" (BFDC, por sus siglas en inglés), desarrollado por un extenso consorcio de investigadores y usuarios en Australia (**Figura 4**, Speirs et al., 2014). Este repositorio de datos investigable contiene actualmente 6000 series de tratamientos experimentales que cubren N, P, K y S para múltiples cultivos. Representa un esfuerzo a nivel nacional basado en el trabajo y la financiación compartidos, y es un gran ejemplo de agronomía basada en la evidencia puesta a disposición a través de una herramienta de apoyo para la toma de decisiones. Se superaron los problemas de intercambio de datos y los beneficios para el manejo de nutrientes en Australia han sido sustanciales.

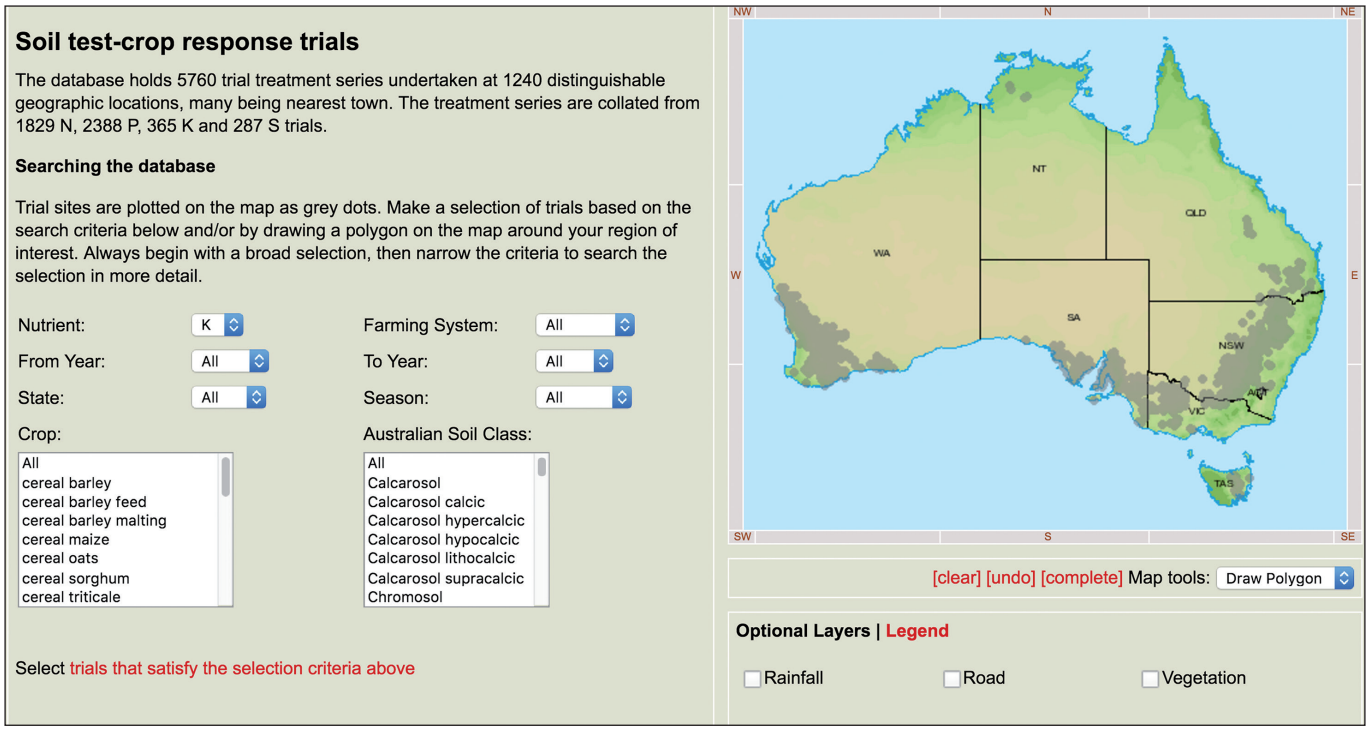

Figura 4. Plataforma on-line "*Making Better Fertiliser Decisions for Cropping Systems in Australia*" (Speirs et al., 2014).

Otro ejemplo donde datos compartidos y agregados entre numerosos investigadores han generado una herramienta de recomendación es "*Nutrient Expert*" (Pampolino et al., 2014). Desarrollado para productores en Asia, donde la información de análisis de suelos a nivel de predio no está normalmente disponible, el programa utiliza datos agregados sobre la absorción de nutrientes y el rendimiento, junto con información específica del predio, para generar una orientación en decisiones sobre la fuente, la dosis y el momento de aplicación de fertilizantes. La colaboración a nivel de datos fue un aspecto clave en este esfuerzo y ha generado una herramienta que proporciona recomendaciones sistemáticamente más rentables y eficientes que las alternativas existentes.

Hay urgencia en reconocer el valor de los datos relevantes de alta calidad para el manejo de nutrientes. Gran parte de los datos existentes hoy en día, que apoyan las prácticas recomendadas, fueron generados por investigadores que están hoy cerca del final o al final de sus carreras, carreras que han sido dedicadas al manejo de nutrientes basado en la ciencia. Sin embargo, los datos tienen su propio ciclo de vida que está puntualizado por etapas clave en el ciclo de vida del investigador los ha generado (**Figura 5**, Michener et al., 1997). Si estos conjuntos de datos no se conservan para su uso futuro, se perderá un recurso valioso que será costoso reproducir.

Por supuesto, el manejo responsable de nutrientes basado en evidencia incluye la síntesis apropiada de la literatura científica utilizando herramientas como el meta-análisis. La evaluación de la literatura publicada sobre la fertilidad del suelo y el manejo de nutrientes en relación con su potencial para contribuir a meta-análisis revela un reto importante para ciertos temas o preguntas. En los últimos años, se han publicado varias revisiones útiles con meta-análisis. Algunos ejemplos incluyen:

- *Decock (2014). Mitigating Nitrous Oxide Emissions from Corn Cropping Systems in the Midwestern U.S.*
- *Linquist et al. (2013). Enhanced Efficiency N Fertilizers for Rice Systems: Meta- analysis of Yield and N Uptake.*
- *Tremblay et al. (2012). Corn Response to N is Influenced by Soil Texture and Weather.*
- *Valkama et al. (2009). Phosphorus Fertilization: A Meta-analysis of 80 Years of Research in Finland.*

Sin embargo, los autores que intentan realizar tales análisis observan que muchos artículos tienden a enfocarse en un efecto de tratamiento en un sitio con información inadecuada sobre métodos, sitios o condiciones para situar adecuadamente el estudio en el contexto de otros estudios. Esto limita el refinamiento de la práctica o el comportamiento del producto para las condiciones específicas de un predio. La lección aquí es que el proceso editorial para las publicaciones que sirven a las necesidades científicas del manejo de nutrientes debe ser más consciente de las necesidades del meta-análisis.

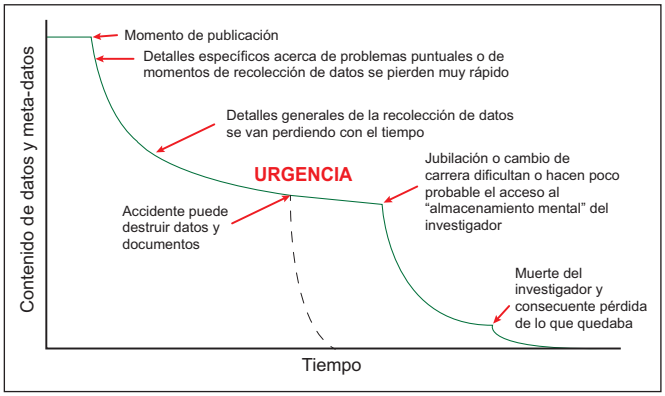

Figura 5. Degradación normal del contenido de información asociada con datos y metadatos a través del tiempo. (Michener et al., 1997).

El rol de las Fuentes de Financiamiento y el Fondo de Investigación 4R

La experiencia nos está mostrando que un medio eficaz para promover enfoques basados en la evidencia es a través de fuentes de financiamiento que lo requieran. Una fuente de financiamiento de ese tipo es el *Fondo de Investigación 4R*, creado en 2013 por la industria norteamericana de fertilizantes, con promesas iniciales de 7 millones de dólares en un periodo de cinco años (http://www.nutrientstewardship.com/funding). El Fondo fue instituido para ayudar a crear una conexión transparente entre las prácticas 4R del Manejo Responsable de Nutrientes y datos que muestran el impacto en indicadores y medidas de sostenibilidad. En este caso, los datos de interés van más allá del desarrollo de las mejores prácticas para incluir datos sobre la efectividad de esas prácticas en la promoción de la sostenibilidad.

Se consideró que la transparencia era esencial para el Fondo y los proyectos apoyados. Dado que la principal fuente de financiación es la industria de fertilizantes y que las partes interesadas en el manejo de nutrientes son un grupo diverso con una amplia gama de prioridades, se previó un escrutinio cuidadoso de los protocolos y resultados del Fondo. Para ayudar a proporcionar la transparencia necesaria, uno de los requisitos para la financiación fue la disposición a enviar datos y artículos a un repositorio de datos e información de acceso abierto. Ese repositorio está siendo construido en la Universidad de Purdue y proporcionará un hogar permanente para los resultados del proyecto y eventualmente para otras investigaciones relacionadas con las 4R. Es un rol único para el cual el Fondo está bien adaptado y proporcionará un medio para vincular el Fondo con proyectos a nivel estatal / provincial.

Los primeros proyectos se iniciaron en 2014 y actualmente hay 18 en los Estados Unidos y Canadá. Además de estos 18 proyectos, la primera fase del programa financió cinco revisiones de la literatura con meta-análisis para ayudar a identificar los impactos conocidos y para identificar brechas de datos. Las propuestas de proyectos y los informes de progreso están disponibles on-line en http://research.ipni.net/toc/category/4r_research_fund. La segunda fase del Fondo se lanzó en 2016 y se guía por estas revisiones y talleres de trabajo.

Consideraciones finales

La agronomía basada en evidencia tiene mucho que ofrecer a la fertilidad de suelos y el manejo de nutrientes como un medio para identificar y cubrir eficientemente brechas reales de datos.

- ¿Por qué una agronomía basada en evidencia?
  - Porque la ciencia debe volverse rápida, ágil y confiable para satisfacer los desafíos de la seguridad alimentaria sostenible.
- ¿Qué es?
  - Es considerar a los datos como un producto primario de la ciencia que crece en valor con accesibilidad y tiempo.
  - Es considerar cada nuevo aporte de investigación como una continuación del proceso de descubrimiento, no solo como un evento independiente.
- ¿Cómo la adoptamos?
  - Compartiendo y publicando conjuntos de datos de calidad con metadatos esenciales, y reconociendo profesionalmente contribuciones de datos.
  - Entrenándonos y entrenando a nuestros estudiantes en el manejo responsable de datos, las revisiones sistemáticas y el meta-análisis.

Bibliografía

Barber, S.A. 1995. Soil Nutrient Bioavailability: a Mechanistic Approach. 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.

Collaboration for Environmental Evidence (CEE). 2013. Guidelines for Systematic Review and Evidence Synthesis in Environmental Management. Version 4.2. Environmental Evidence: www.environmentalevidence.org/Documents/Guidelines/Guidelines4.2.pdf

Decock, C. 2014. Mitigating Nitrous Oxide Emissions from Corn Cropping Systems in the Midwestern U.S.: Potential and Data Gaps. dx.doi.org/10.1021/es4055324. Environ. Sci. Technol. 2014, 48, 4247–4256.

Fixen, P.E. 1992. Personalizing Soil Test Interpretation. In Proceedings of the Soils Fertilizer and Agricultural Pesticides Short Course and Exposition. U of Minnesota Extension Service, St. Paul, MN. pp 20-30.

Isaacson, B. 2015. To Feed Humankind, We Need the Farms of the Future Today. Newsweek, October 22.

Lazer, D., R. Kennedy, G. King, y A. Vespignani. 2014. The Parable of Google Flu: Traps in Big Data Analysis. Science 343:1203-1205.

Linquist, B.A., L. Liu, C. van Kessel, y K.J. van Groenigen. 2013. Enhanced Efficiency Nitrogen Fertilizers for Rice Systems: Meta-analysis of Yield and Nitrogen Uptake. Field Crops Research 154:246-254.

Lockers, R., y S. Janssen. 2014. Putting Food Security Research in Practice at Wageningen UR. Proceedings of Exploiting Global Knowledge for Food-security through Cooperation, Co-creation and Sharing of Information. ICRI, Athens. April 3, 2014.

Michener, W.K. 2015. Ten Simple Rules for Creating a Good Data Management Plan. PLoS Computational Biology 11(10): e1004525. doi: 10.1371/ journal.pcbi. 1004525.

Michener, W.K., J.W. Brunt, J.J. Helly, T.B. Kirchner, y S.G. Stafford. 1997. Nongeospatial Metadata for the Ecological Sciences. Ecological Applications 7(1):330-342.

Pampolino, M.F., C. Witt, J.M. Pasuquin, A.M. Johnston, y M.J. Fisher. 2014. Development and Evaluation of Nutrient Expert® Decision Support Tool for Cereal Crops. Better Crops – South Asia 2014:4-6.

Piwowar, H.A., y T.J. Vision. 2013. Data Reuse and the Open Data Citation Advantage. PeerJ 1: e175; doi: 10.7717/peerj. 175.

Potash & Phosphate Institute (PPI). 1994. PKMAN: A Tool for Personalizing P and K Management. Version 1.0. Potash & Phosphate Institute, Norcross, GA.

Speirs, S., M.Conyers, D. Reuter, K. Peverill, C. Dyson, G. Watmuff, y R.Norton. 2014. Development of and Australian Soil Test Calibration Database. Better Crops 98(3):16-17.

Tremblay, N., Y.M. Bouroubi, C. Bélec, R.W. Mullen, N.R. Kitchen, W.E. Thomason, S. Ebelhar, D.B. Mengel, W.R. Raun, D.D. Francis, E.D. Vories, y I. Ortiz-Monasterio. 2012. Corn Response to Nitrogen is Influenced by Soil Texture and Weather. Agron. J. 104:1658-1671.

Valkama, E., R. Uusitalo, K. Ylivainio, P. Virkaja¨rvi, y E. Turtola. 2009. Phosphorus fertilization: A Meta-analysis of 80 Years of Research in Finland. Agriculture, Ecosystems and Environment. 130:75-85.

Evaluación del impacto ambiental del manejo agrícola en tres sistemas agrícolas argentinos*

Florencia Rositano[1,*], Federico E. Bert[2], Gervasio Piñeiro[3] y Diego O. Ferraro[1]

- *El proceso de agriculturización ha generado una percepción de amenaza para la sustentabilidad de los agroecosistemas pampeanos, lo que ha llevado a describir los síntomas de deterioro mediante indicadores.*
- *Se evaluó el impacto ambiental de diez años de agricultura en tres zonas agrícolas argentinas con distintas características agroecológicas mediante cuatro indicadores.*
- *El único indicador que pareciera ser impactado por las prácticas de manejo agrícola fue el N disponible en suelo.*

Introducción

La producción agrícola modifica la estructura (es decir, los componentes bióticos y abióticos) y la funcionalidad (es decir, los procesos ecológicos) de los ecosistemas. En las últimas dos décadas, los agroecosistemas pampeanos han sido sometidos a una alta tasa de cambio en su estructura y funcionalidad (Satorre, 2005). La concentración de la producción y el manejo agrícola facilitó la adopción generalizada de tecnologías orientadas al consumo de insumos (maquinaria, fertilizantes, pesticidas, etc.) y a la aplicación de procesos (es decir, sistemas de manejo con un alto componente de información y conocimiento, como la siembra directa y la agricultura de precisión) (Manuel Navarrete et al., 2009). En este último caso, aproximadamente el 90% de la superficie de cultivos extensivos se realiza actualmente bajo siembra directa.

La magnitud de las transformaciones que implica el proceso de agriculturización ha generado una percepción de amenaza para la sustentabilidad de los agroecosistemas pampeanos (Casas, 2003; Manuel-Navarrete et al., 2005), lo que ha llevado a describir mediante indicadores los síntomas de deterioro. Diversos autores han utilizado distintos indicadores con el objetivo de evaluar la trayectoria de impacto ambiental de las prácticas de manejo agrícola en los agroecosistemas pampeanos. Estos ejercicios de diagnóstico dan como resultado diversas tendencias que mantienen un alto grado de incertidumbre. Carreño y Viglizzo (2007), por ejemplo, establecieron que las modificaciones ocurridas en el ámbito productivo han tenido poco impacto ambiental en los agroecosistemas pampeanos.

En base a estos antecedentes, en este trabajo se seleccionó un conjunto de cuatro indicadores para evaluar el impacto ambiental de diez años de agricultura en tres zonas agrícolas argentinas con distintas características agroecológicas.

Metodología

A partir de una revisión bibliográfica, se construyeron cuatro modelos conceptuales con los que se representó el conocimiento existente sobre los efectos del manejo agrícola en los siguientes cuatro componentes de los agroecosistemas pampeanos: 1) Balance de carbono (C) del suelo, 2) Balance de nitrógeno (N) del suelo, 3) Control de contaminación del agua subterránea, y 4) Control de emisión de oxido nitroso (N_2O) (Rositano y Ferraro, 2014). Estos cuatro modelos estuvieron modulados por variables de entrada ambientales (temperatura, precipitaciones), edáficas (erosión, textura del suelo) y productivas (rendimiento, fertilización nitrogenada, riego). Asimismo, cada modelo tuvo una variable respuesta: contenido de C en suelo, N disponible en suelo, concentración de NO_3 en agua subterránea, y desnitrificación, para los modelos 1, 2, 3, y 4, respectivamente.

En el modelo de Balance de C del suelo, la entrada de C al sistema consiste en el aporte por descomposición de los residuos de los cultivos y sus raíces; mientras que las pérdidas son causadas por la mineralización de la materia orgánica y la erosión del suelo.

En el modelo de Balance de N del suelo, la disponibilidad de N para el siguiente cultivo de la rotación es modulada por la mineralización de la materia orgánica, el residuo de cosecha del cultivo previo, el régimen de fertilización nitrogenada, y las pérdidas de N al ambiente (en este caso, sólo desnitrificación y lixiviación).

En el modelo de Control de contaminación del agua subterránea, la concentración de NO_3 está directamente relacionada con la fertilización nitrogenada, la textura del suelo y el contenido de agua en el sistema a través del régimen de precipitaciones y del riego.

En el modelo de Control de emisión de N_2O, la desnitrificación es el principal proceso que favorece las emisiones directas de N_2O desde el suelo hacia la

1 IFEVA. Universidad de Buenos Aires. CONICET. Departamento de Producción Vegetal. FAUBA
2 Universidad de Buenos Aires. CONICET. Departamento de Producción Vegetal. FAUBA
3 IFEVA. Universidad de Buenos Aires. CONICET. Departamento de Recursos Naturales. FAUBA
* Autor de contacto. Correo electrónico: rositano@agro.uba.ar

atmósfera; en los agroecosistemas pampeanos, los principales factores determinantes de la desnitrificación son la disponibilidad de N en el suelo y el contenido de humedad. La presencia de plantas en crecimiento activo limita el proceso de desnitrificación, debido a la menor disponibilidad de agua y, en una menor medida, a niveles más bajos de NO_3 en el suelo. Asimismo, la fertilización nitrogenada aumenta significativamente el N disponible en el suelo y, como consecuencia, la desnitrificación.

La cuantificación de estos modelos conceptuales se llevó a cabo mediante una metodología probabilística conocida como Redes Bayesianas, construidas mediante el software Netica (http://www.norsys.com/) (Norsys Software Corp., 2009). Una Red Bayesiana es un sistema experto que representa gráficamente un conjunto de variables y sus relaciones o dependencias condicionales teniendo en cuenta un conjunto de distribuciones de probabilidad (Korb y Nicholson, 2004; Jensen y Nielsen, 2007). En términos generales, esta metodología probabilística puede ser representada visualmente como un conjunto de nodos (o variables) conectados por flechas unidireccionadas **(Figura 1)**. Los nodos representan las variables y sus posibles estados, mientras que las flechas representan las relaciones causales entre los nodos. Cada nodo o variable puede tomar diferentes estados (por ejemplo, alto/medio/bajo) con el fin de mejorar la precisión del modelo. La estimación de los estados de las variables se describe en detalle en Rositano y Ferraro (2014). Los estados son grupos delimitados por intervalos o rangos de las variables bajo estudio. El número de estados depende de la información que se desee transmitir y de los posibles valores que pueda llegar a tomar la variable (Dlamini, 2010). La sumatoria de los estados de una variable en particular debe ser 1 (en términos probabilísticos) o 100 (en términos porcentuales). En este caso particular, las variables presentaron entre dos y tres estados (Rositano y Ferraro, 2014).

En una Red Bayesiana, aquellas variables determinadas por una o más variables están caracterizadas por una tabla de probabilidad condicional que representa la combinación de todos los estados de las variables de las cuales depende junto con sus valores probabilísticos. Por su parte, las variables de entrada del modelo tienen distribuciones probabilísticas marginales que representan la frecuencia de cada estado (Chen y Pollino, 2012). En este caso, las tablas de probabilidad condicional fueron el resultado de un proceso de obtención del conocimiento en base a entrevistas a investigadores involucrados en diversas áreas (por ejemplo, fertilización de cultivos, contaminación ambiental por fertilizantes, dinámica de nutrientes, calidad y contaminación del agua subterránea, fertilidad del suelo) de los sistemas agrícolas pampeanos.

Finalmente, las variables de entrada de los modelos construidos se cuantificaron con bases de datos ambientales y productivas provenientes de tres zonas agrícolas pampeanas con distintas características agroecológicas: 1) Norte de Córdoba (NC), 2) Centro de Buenos Aires (CBA), y 3) Sur de Entre Ríos (SER). Las bases de datos ambientales fueron provistas por el Servicio Meteorológico Nacional y por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, mientras que las bases de datos productivas contenían información proveniente de lotes agrícolas de las tres zonas. De esta manera, se estimaron y compararon los valores de estas variables para diez campañas agrícolas (2000/2001 - 2009/2010) y tres cultivos (maíz, soja y trigo).

Para analizar los resultados se utilizó la estadística descriptiva; específicamente, diagramas de caja con el objetivo de mostrar los patrones emergentes en las tres zonas agrícolas y en los tres cultivos.

Resultados

Se observaron diferencias mínimas tanto entre zonas agrícolas **(Figura 2)** como entre cultivos **(Figura 3)**. Las

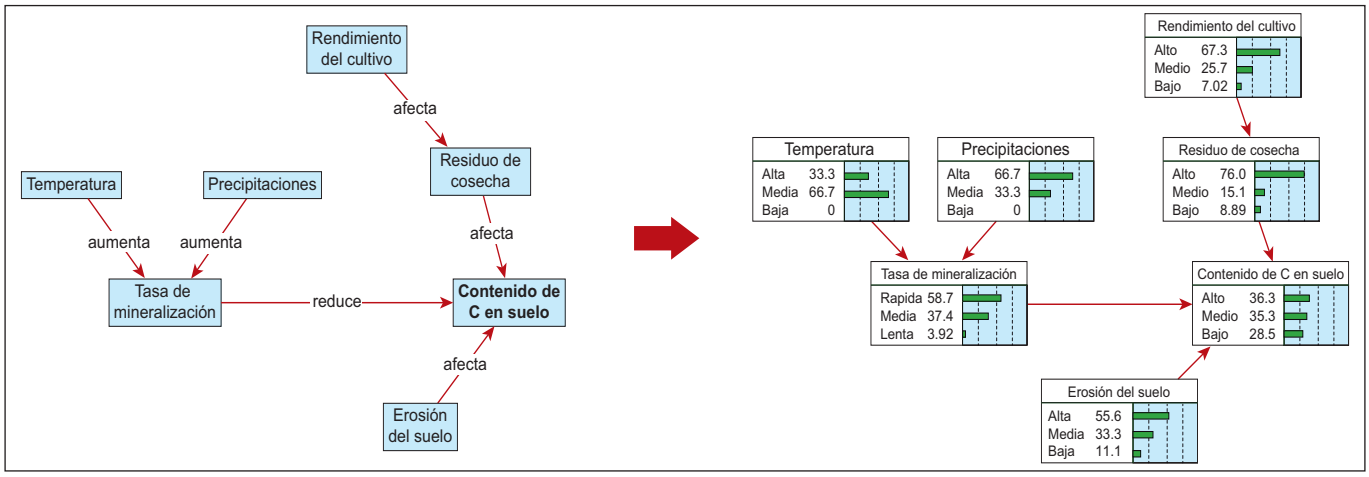

Figura 1. Conversión del modelo conceptual Balance de carbono (C) del suelo en una Red Bayesiana. En la Red Bayesiana, las variables de entrada (Temperatura, Precipitaciones, Rendimiento del cultivo, y Erosión del suelo) se cuantificaron con información ambiental y productiva correspondiente a la zona Sur de Entre Ríos para el cultivo de maíz durante la campaña 2000/2001, mientras que los valores de probabilidad de las restantes variables (Tasa de mineralización, Residuo de cosecha, y Contenido de C en suelo) fueron obtenidos a partir de entrevistas a investigadores relacionados con la temática. La variable respuesta de este modelo es Contenido de C en suelo. (Adaptado de Rositano y Ferraro, 2017).

diferencias se observaron entre indicadores, siendo *Alto N disponible en suelo* aquel que no se encontró en condiciones deseables debido a que presentó bajos valores de probabilidad **(Figuras 2 y 3)**.

En términos de obtener mayor legibilidad en los resultados, se muestran únicamente aquellos estados de la variable respuesta con mayor relación con la sustentabilidad ambiental de los agroecosistemas: 1) *Alto* Contenido de C en suelo, 2) *Alto* N disponible en suelo, 3) *Baja* Concentración de NO_3 en agua subterránea, y 4) *Baja* Desnitrificación. La estimación de los estados de respuesta de las variables se describe en detalle en Rositano y Ferraro (2014).

En el caso de *Alto Contenido de C en suelo*, las probabilidades encontradas fueron mayores en CBA (Mediana = 61%), en comparación con las zonas SER (53%) y NC (54%) **(Figura 2A)**. El cultivo de soja obtuvo los menores valores de probabilidad de este indicador (46%). Los cultivos de maíz y trigo presentaron valores mayores que el cultivo de soja (63% y 58%, respectivamente) **(Figura 3A)**.

En el caso de *Alto N Disponible en suelo*, las probabilidades halladas fueron similares entre NC (17%), CBA (20%) y SER (19%) **(Figura 2B)**. En el caso de los cultivos, las probabilidades encontradas también fueron similares entre ellos. El cultivo de soja presentó un valor de probabilidad de 16% **(Figura 3B)**. En el caso de los cultivos de trigo y maíz, el valor para este indicador, en ambos casos, fue de 20% **(Figura 3B)**.

En el caso de *Baja Concentración de NO_3 en agua subterránea*, las probabilidades halladas para CBA (61%) y para SER (67%) fueron mayores en comparación con aquellas del NC (50%) **(Figura 2C)**. Tanto el cultivo de soja como el cultivo de maíz obtuvieron menores valores de probabilidad de este indicador (53% y 55%, respectivamente), en comparación con el cultivo de trigo (61%) **(Figura 3C)**.

En el caso de *Baja Desnitrificación*, las probabilidades halladas para NC (83%), SER (87%) y CBA (83%) fueron similares **(Figura 2D)**. En la zona agrícola SER, se observó un caso con un valor de probabilidad de 7%. No se observaron diferencias en los valores de probabilidad hallados para los cultivos de trigo, maíz y soja, siendo en los tres casos de 83% **(Figura 3D)**. En maíz y soja, se observaron dos casos con valores de probabilidad de 5.5% y 7%, respectivamente.

En la **Figura 4**, se presentan los cuatro indicadores seleccionados en las tres zonas agrícolas pero únicamente para el cultivo de maíz, ya que para los dos cultivos restantes el patrón observado fue similar (en el caso de soja, con valores de probabilidad ligeramente menores para Alto Contenido de C en suelo y Alto N disponible en suelo). Estos resultados mostraron que durante los diez años analizados el valor de los indicadores permaneció relativamente

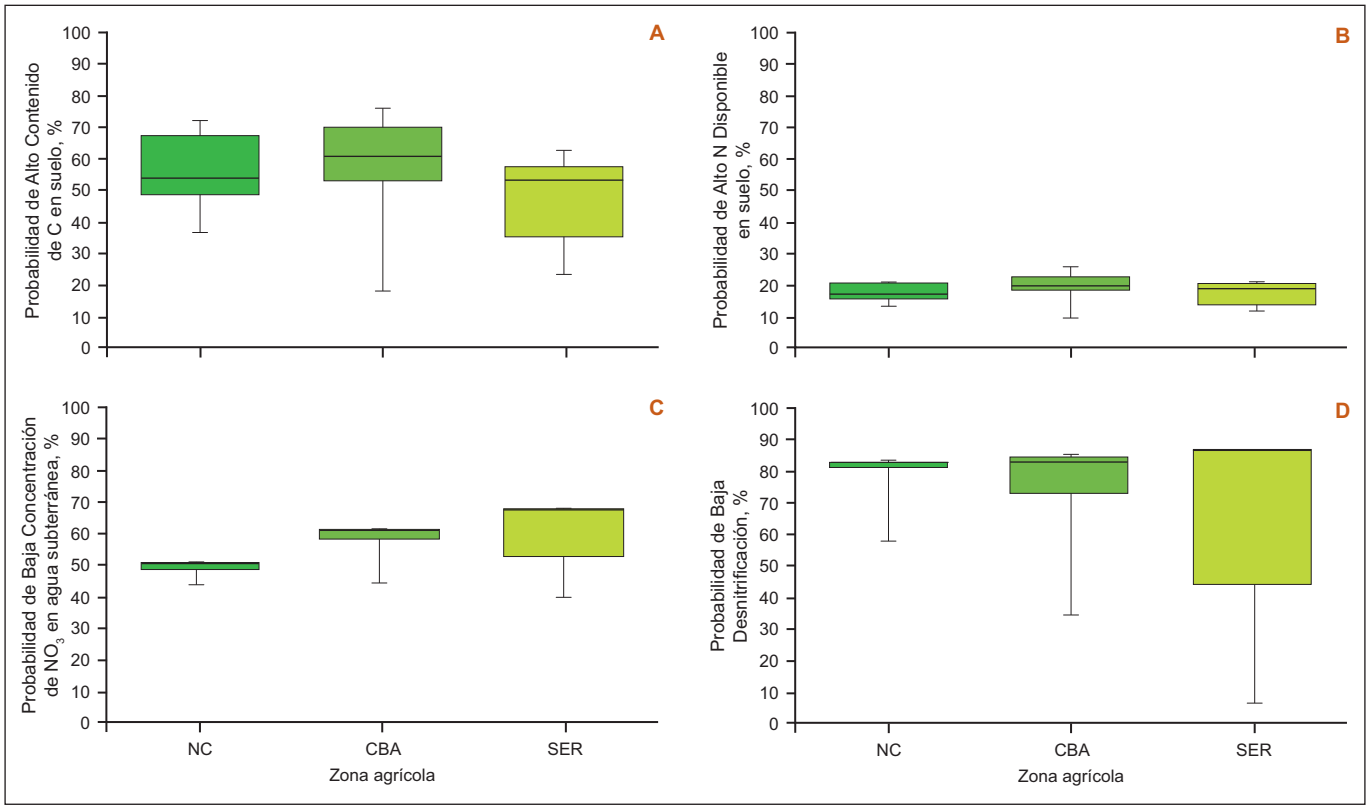

Figura 2. Respuesta probabilística de cada indicador en las tres zonas agrícolas bajo estudio. Las líneas inferiores y superiores de las cajas representan los cuartiles Q1 (25% de los datos), y Q3 (75% de los datos), respectivamente, en tanto que la línea en la caja corresponde al cuartil Q2 o mediana (50% de los datos) para cada zona, considerando las diez campañas agrícolas (2000/2001 – 2009/2010) y los tres cultivos (trigo, maíz y soja) bajo estudio. Los bigotes representan los valores mínimo y máximo de cada situación. En cada caja, n = 30. Referencias: NC = Norte de Córdoba; CBA = Centro de Buenos Aires; SER = Sur de Entre Ríos.

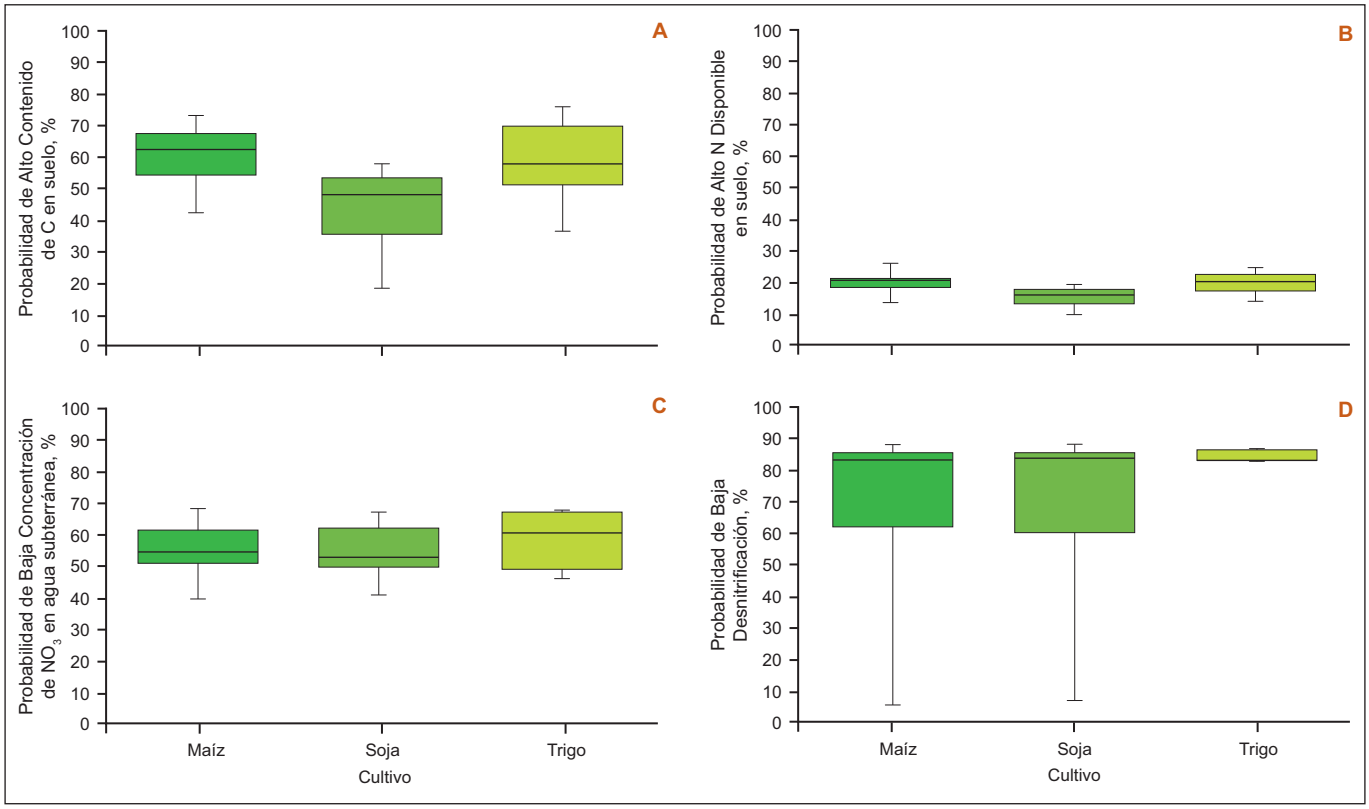

Figura 3. Respuesta probabilística de cada indicador en los tres cultivos bajo estudio. Las líneas inferiores y superiores de las cajas representan los cuartiles Q1 (25% de los datos), y Q3 (75% de los datos), respectivamente, en tanto que la línea en la caja corresponde al cuartil Q2 o mediana (50% de los datos) para cada zona, considerando las diez campañas agrícolas (2000/2001 – 2009/2010) y las tres zonas agrícolas (Norte de Córdoba, Centro de Buenos Aires, y Sur de Entre Ríos) bajo estudio. Los bigotes representan los valores mínimo y máximo de cada situación. En cada caja, n = 30.

constante en las tres zonas analizadas, salvo en el caso de Baja Desnitrificación donde tres campañas agrícolas presentaron disminuciones abruptas en sus valores debido a incrementos en los valores de probabilidad de la variable Precipitaciones en su estado Alto. Este factor ambiental es un fuerte modulador de la desnitrificación ya que las bacterias que desencadenan este proceso son anaeróbicas y se ven favorecidas en suelos anegados o mal drenados.

Discusión

El *Alto Contenido de C* en suelo permaneció relativamente constante tanto entre zonas agrícolas **(Figura 2A)** como entre cultivos **(Figura 3A)** como consecuencia de un manejo agrícola adecuado. En este sentido, este indicador obtuvo valores de probabilidad mayores al 50%. Estos resultados, sin embargo, pueden estar enmascarados por la escala de tiempo bajo estudio ya que, por ejemplo, Caride et al. (2012) analizaron los cambios en el carbono orgánico del suelo (COS) luego de 60 años bajo diferentes prácticas de manejo agrícola en la sub-región Pampa Ondulada y mostraron que el COS disminuyó en ese periodo de tiempo.

El indicador *Alto N Disponible en suelo* no se encontró en una condición deseable tanto a nivel de zona agrícola **(Figura 2B)** como de cultivo **(Figura 3B)**. Esto se constató con las bajas probabilidades obtenidas en ambos casos. En general, es común hallar balances negativos entre los ingresos y egresos de N de los sistemas agrícolas en región pampeana debido a los bajos niveles de fertilización nitrogenada que no restauran completamente los niveles originales de fertilidad de estos suelos (Austin et al., 2006; Lavado y Taboada, 2009).

Las pérdidas de N al ambiente fueron bajas tanto entre zonas agrícolas **(Figura 2C y 2D)** como entre cultivos **(Figura 3C y 3D)**, confirmando lo establecido por algunos autores en cuanto a que las pérdidas de N son considerablemente bajas en los agroecosistemas pampeanos (Rimski-Korsakov et al., 2004; Álvarez y Grigera, 2005). En este sentido, los bajos niveles de aplicación de fertilización nitrogenada al sistema determinaron no sólo bajos valores de probabilidad de Alto N disponible en suelo **(Figuras 2B, 3B y 4B)**, sino también un Balance de N en el suelo negativo que afectó positivamente el control de contaminación del agua subterránea. Es decir, la concentración de NO_3 en agua subterránea disminuyó al mismo tiempo que lo hizo el N disponible en suelo **(Figuras 2C, 3C y 4C)**.

Conclusión

En este trabajo, se evaluó el impacto ambiental de diez años de agricultura en tres zonas argentinas con distintas características agroecológicas mediante cuatro indicadores: Contenido de C en suelo, N disponible en suelo, Concentración de NO_3 en agua subterránea, y Desnitrificación. En términos generales, el único indicador que resaltó que las prácticas de manejo agrícola parecieran estar impactándolo fue el N disponible en suelo. Si bien la productividad de las zonas bajo estudio se vería

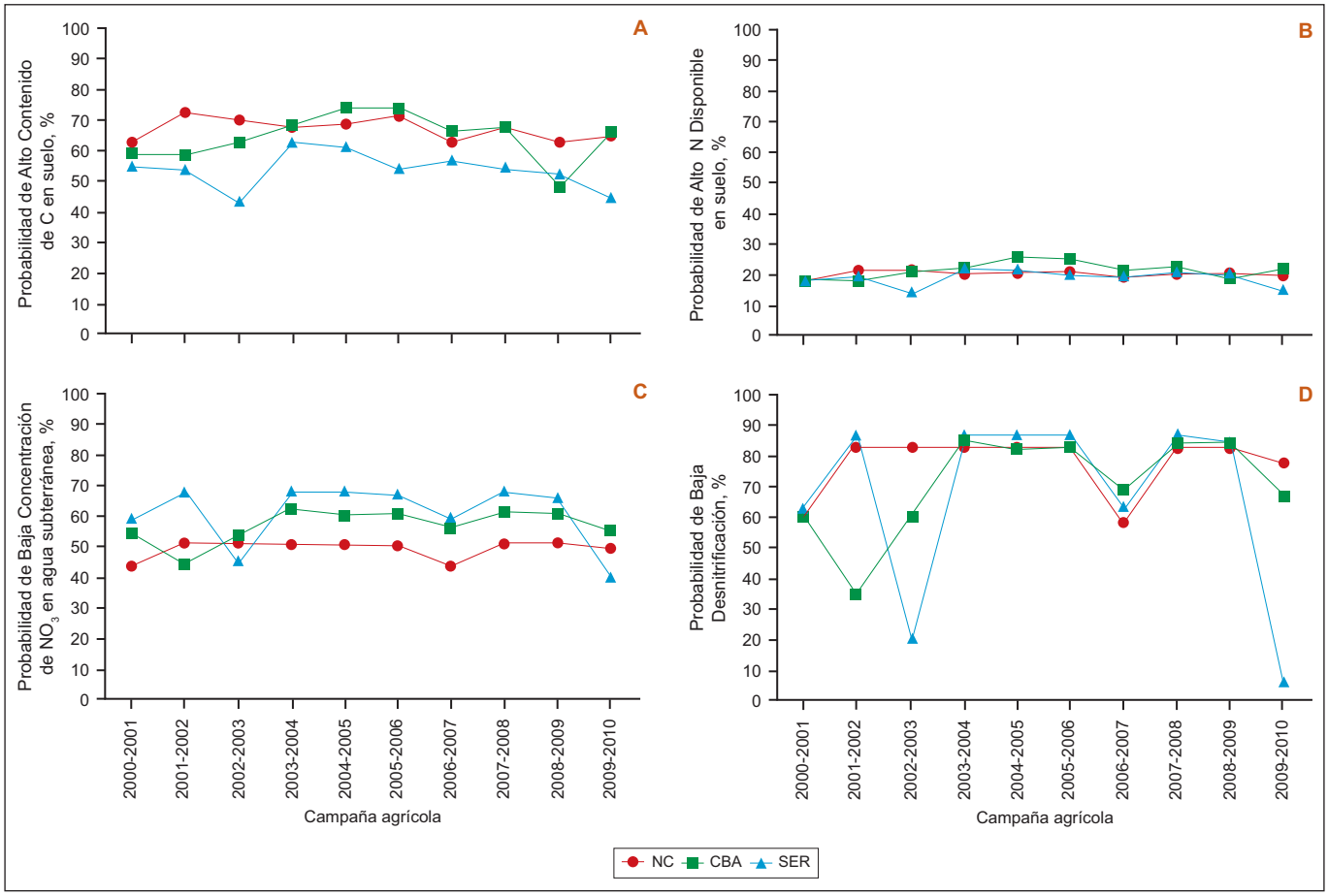

Figura 4. Respuesta probabilística de cada indicador considerando las diez campañas agrícolas (2000/2001 – 2009/2010) y las tres zonas agrícolas (Norte de Córdoba, Centro de Buenos Aires, y Sur de Entre Ríos) bajo estudio. Referencias: NC = Norte de Córdoba; CBA = Centro de Buenos Aires; SER = Sur de Entre Ríos.

perjudicada por los bajos niveles nitrogenados, no ocurriría lo mismo en términos ambientales. En este sentido, las pérdidas de N al ambiente (particularmente, lixiviación y desnitrificación) no fueron relevantes, siguiendo la lógica de la disponibilidad de N en el suelo.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (PIP 555), por la Agencia Nacional de Promoción Científica (PICT 1559) y por la Universidad de Buenos Aires (UBACYT 20020110100196). F. Rositano fue beneficiaria de una beca doctoral CONICET. Los autores agradecen a María Celeste Gregoret (CREA Córdoba Norte), Fernando García Frugoni (CREA Litoral Sur), Mercedes Prado (CREA Litoral Sur), y Gonzalo Ropero (CREA Roque Pérez-Saladillo), por las bases de datos suministradas.

Bibliografía

Álvarez, R., y S. Grigera. 2005. Analysis of soil fertility and management effects on yields of wheat and corn in the Rolling Pampa of Argentina. Journal of Agronomy & Crop Science 191:321-329.

Austin, A.T., G. Piñeiro, M. Gonzalez-Polo. 2006. More is less: agricultural impacts on the N cycle in Argentina. Biogeochemistry 79:45-60.

Caride, C., G. Piñeiro, y J.M. Paruelo. 2012. How does agricultural management modify ecosystem services in the argentine Pampas? The effects on soil C dynamics. Agriculture, Ecosystems & Environment 154:23-33.

Carreño, L.V., y E.F. Viglizzo. 2007 Provisión de servicios ecológicos y gestión de los ambientes rurales en Argentina. Ediciones INTA. pp. 74.

Casas, R. 2003. Sustentabilidad de la agricultura en la región Pampeana. EEA Balcarce. Ediciones INTA.

Chen, S.H., y C.A. Pollino. 2012. Good practice in Bayesian network modelling. Environmental Modelling & Software 37:134-145.

Dlamini, W.M. 2010. A Bayesian belief network analysis of factors influencing wildfire occurrence in Swaziland. Environmental Modelling & Software 25:199-208.

Jensen, F.H., y T.D. Nielsen. 2007. Bayesian Networks and Decision Graphs. Springer Verlag.

Korb, K.B., y A.E. Nicholson. 2004. Bayesian Artificial Intelligence. Chapman and Hall/CRC Press, London.

Lavado, R.S., y M.A. Taboada. 2009. The Argentinean Pampas: A key region with a negative nutrient balance and soil degradation needs better nutrient management and conservation programs to sustain its future viability as a world agroresource. Journal of Soil and Water Conservation 64:150-153.

Manuel-Navarrete, D., G. Gallopín, M. Blanco, M. Díaz-Zorita, D.O. Ferraro, H. Herzer, P. Laterra, J. Morello, M.R. Murmis, W. Pengue, M. Piñeiro, G. Podestá, E.H. Satorre, M. Torrent, F. Torres, E. Viglizzo, M.G. Caputo, y A. Celis. 2005. Análisis sistémico de la agriculturización en la pampa húmeda argentina y sus consecuencias en regiones extrapampeanas: sostenibilidad, brechas de conocimiento e integración de políticas. CEPAL. Serie Medio Ambiente y Desarrollo N° 118. Santiago de Chile, Chile. pp. 65.

Manuel-Navarrete, D., G. Gallopín, M. Blanco, M. Díaz-Zorita, D.O. Ferraro, H. Herzer, P. Laterra, M. Murmis, G. Podestá, J. Rabinovich, E. Satorre, F. Torres, y E. Viglizzo. 2009. Multi-causal and integrated assessment of sustainability: the case of agriculturization in the Argentine Pampas. Environment, Development and Sustainability 11:612-638.

Norsys Software Corp. 2009. Netica. www.norsys.com

Rimski-Korsakov, H., G. Rubio, y R.S. Lavado. 2004. Potential nitrate losses under different agricultural practices in the pampas region, Argentina. Agricultural Water Management 65:83-94.

Rositano, F., y D.O. Ferraro. 2014. Ecosystem services provided by agroecosystems: A qualitative and quantitative assessment of this relationship in the Pampa region, Argentina. Environmental Management 53(3):606-619.

Rositano, F., y D.O. Ferraro. 2017. Una nueva aproximación metodológica basada en redes conceptuales y redes probabilísticas para evaluar la provisión de servicios de los ecosistemas. Ecología Austral 27:10-17.

Satorre, E.H. 2005. Cambios tecnológicos en la agricultura argentina actual. Ciencia Hoy 15:24-31.

Profundidad de muestreo para el análisis de nitrato en suelos del sudoeste de Buenos Aires, Argentina

Josefina P. Zilio[*, 1], Franco F. Frolla[1] y Hugo R. Krüger[1]

- *El contenido de nitrógeno (N) como nitrato (N-nitrato) a 0-60 cm es el método diagnóstico más utilizado para realizar el ajuste de la fertilización nitrogenada en varios cultivos de la región pampeana argentina. Sin embargo, el muestreo de todo el estrato no siempre es posible por distintas razones operativas.*
- *El análisis de datos de 5 campañas en el SO de Buenos Aires permitió generar la ecuación de predicción más confiable utilizando como estimador el contenido de N-nitrato en 0-40 cm. En promedio, el estrato 0-60 cm contiene un 29% más de N que a 0-40 cm.*
- *El contenido de N-nitrato a 0-20 cm resultó un estimador significativamente menos confiable.*

En el área de influencia de la EEA Bordenave, que abarca 9 distritos ubicados en el SO bonaerense de Argentina **(Figura 1)**, los cultivos de trigo y cebada concentran más de 448 000 ha, representando el 14% del área sembrada y el 11% de la producción cerealera provincial (Ministerio de Agroindustria-MA, 2016). A pesar que estos números resultan relativamente bajos a escala nacional, el impacto de estos cultivos es muy alto en las economías regionales, en especial en los distritos del oeste. Mientras que la superficie dedicada a estos cultivos es cercana al 52% en los distritos subhúmedos, la cifra asciende a 90% en la zona semiárida (cálculos propios en base a datos de MA, 2016).

Los factores más limitantes en la producción de estos cereales son la disponibilidad de agua, N y fósforo (P). Para diagnosticar la fertilidad de un lote y poder corregir las deficiencias de nutrientes, es necesario realizar un correcto análisis de suelo. En este sentido, el contenido de N-nitrato es el método diagnóstico más utilizado para realizar el ajuste de la fertilización nitrogenada en varios cultivos de la región pampeana argentina.

Es conocida la influencia de la humedad y la temperatura en la disponibilidad de N en el suelo, ya que marcan la velocidad de mineralización y liberación desde la materia orgánica. Además, el nitrato es altamente soluble en la solución edáfica y susceptible de ser lixiviado hacia capas más profundas. A dicha pérdida, también se le pueden sumar aquellas ocasionadas por desnitrificación, cuya magnitud dependerá de las condiciones ambientales, principalmente humedad y temperatura, ya que regulan los procesos microbianos que le dan origen. Estas características obligan a realizar los muestreos cercanos al momento de la fertilización.

Una consulta frecuente es la profundidad de muestreo. La profundidad más ampliamente recomendada es el muestreo hasta los 60 cm, ya que el contenido de nitrato en dicho espesor correlaciona estrechamente con el rendimiento, especialmente para las gramíneas como el trigo o el maíz. Para el primero, diferentes investigadores determinaron el nivel umbral crítico de N-nitrato medido a 60 cm de profundidad para la obtención de rendimientos determinados según zona productiva

[1] **INTA EEA Bordenave**
[*] **Autor de contacto. Correo electrónico: zilio.josefina@inta.gob.ar**

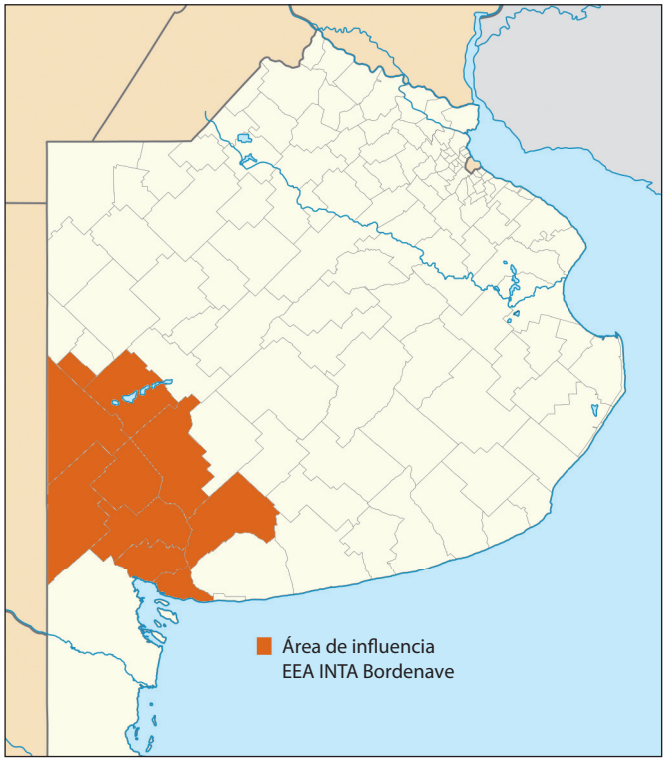

Figura 1. Área de influencia de la EEA INTA Bordenave, Buenos Aires, Argentina.

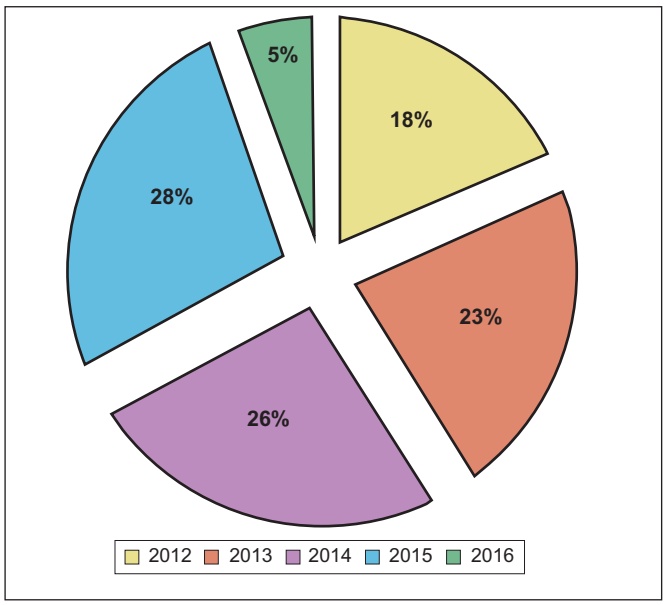

Figura 2. Distribución temporal de las muestras de suelo para N-nitrato que conformaron la base de datos analizada (n = 1348). Laboratorio de Análisis de Suelos, EEA INTA Bordenave. Campañas 2012-2016.

(Echeverría y García, 2015). Por otra parte, se reciben consultas sobre la posibilidad de muestrear en capas más superficiales, sobre todo cuando los tiempos operativos son reducidos y no se cuenta con buenas condiciones edáficas (ya sea anegamiento o, por el contrario, suelos duros o compactados). Con respecto a ello, la bibliografía muestra relaciones entre la concentración de N-nitrato entre la capa 0-60 cm y capas más superficiales (Barbieri et al., 2009; Bono y Alvarez, 2007) lo que permitiría estimar, aunque con ciertos recaudos, la cantidad de N en el perfil hasta los 60 cm, realizando un muestreo a 0-20 y 20-40 cm, respectivamente. Los valores que suelen utilizarse corresponden generalmente a otras zonas productivas, por lo que resultaba necesario realizar un ajuste para la zona de influencia de la EEA INTA Bordenave.

Para disponer de información sobre la relación entre la cantidad de N-nitrato entre la capa 0-60 cm y capas más superficiales en la región (0-20 y 0-40 cm), se utilizó la base de datos del Laboratorio de Análisis de Suelos de la EEA INTA Bordenave correspondiente a las campañas 2012-2016 **(Figura 2)**. Luego del análisis de residuales, se procedió a la eliminación de datos ajenos a la población (*outliers*) según el método de residuos estudentizados (Di Rienzo et al., 2012). La base de datos quedó conformada por 1348 muestras, todas con análisis de N-nitrato a 0-20, 20-40 y 40-60 cm de profundidad. Excepto la campaña 2016, con menor cantidad de muestras, las campañas presentaron una frecuencia relativa similar. Los meses más frecuentes fueron mayo, junio y septiembre, coincidentes con la siembra y el macollaje avanzado del cultivo de trigo y cebada. El análisis de los datos se realizó a través de regresiones lineales simples, utilizando el programa estadístico INFOSTAT® (Di Rienzo et al. 2012).

Luego de utilizar el contenido de N-nitrato 0-20 y 0-40 cm como predictores del valor de N-nitrato a 0-60 cm, se compararon parámetros de ambas regresiones para definir la más conveniente. Se observa que N-Nitrato a 0-40 cm presentó, respecto de 0-20 cm, menores valores del error estándar (EE) de la ordenada al origen (a) como de la pendiente de la regresión (b), como así también un menor valor del Cuadrado Medio del Error (CME) y un mayor coeficiente de determinación (R^2). Esto finalmente se traduce en una mayor precisión en la predicción del valor a 0-60 cm **(Tabla 1)**.

Si bien el ajuste de la regresión a partir del contenido N-nitrato 0-20 fue bueno (R^2 = 0.85), la estimación del valor real resalta una falta de precisión que podría derivar en una recomendación errónea por sub o sobreestimar el valor real de N en el suelo **(Figura 3A)**. En cambio, la relación existente entre el contenido de N-nitrato medido en la capa 0-60 cm con respecto al medido en la capa 0-40 cm **(Figura 3B)** presenta un ajuste más preciso (R^2 = 0.98). Tanto la pendiente de la regresión como la ordenada al origen resultaron altamente significativas ($p < 0.0001$), lo que define la **Ecuación 1**:

$$N\text{-}NO_3\ (0\text{-}60\ cm) = 1.29*(N\text{-}NO_3\ 0\text{-}40) + 1.03 \qquad \textbf{Ec. 1}$$

La pendiente de la ecuación (a = 1.29) es el factor por el cual debe multiplicarse el contenido de nitrato en la capa 0-40 cm para estimar el contenido a 0-60 cm y continuar con los cálculos de fertilización. Es decir, que el contenido en la capa 0-60 es 29% mayor que aquel que se mide en los primeros 40 cm de suelo. Valores similares fueron reportados por Barbieri et al. (2009) quienes encontraron que dicho factor osciló entre 1.24 y 1.28 para muestreos de siembra y macollaje respectivamente, sobre Argiudoles típicos del SE bonaerense. Bono y Alvarez (2007), trabajando sobre suelos de distintas

Tabla 1. Comparación de algunos parámetros del análisis de regresión para estimar el contenido de N-nitrato a 0-60 cm.

Parámetro	Predictor	
	0-20 cm	0-40 cm
Ordenada al origen (a)	8.13	1.03
EE (a)	0.79	0.31
Pendiente (b)	2.00	1.29
EE (b)	0.02	0.01
CME	168.73	24.05

Tabla 2. Comparación del intervalo de predicción del contenido de N-nitrato a 0-60 cm en base al contenido en dos estratos más superficiales 0-20 cm y 0-40 cm. Datos de 5 campañas (2012-2016) provistos por LABOR, EEA INTA Bordenave.

Parámetro	N-nitrato	
	0-20 cm	0-40 cm
Mediana	28.0	49.6
N-nitrato a 0-60 cm (estimado)	64.1	65.0
Valor mínimo estimado	38.7	55.4
Valor máximo estimado	89.7	74.6

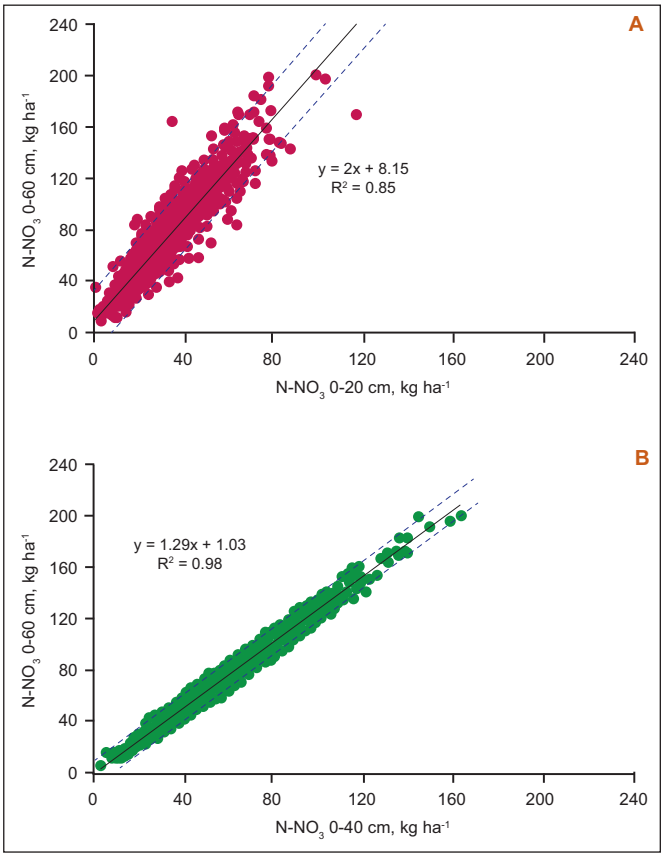

Figura 3. Predicción del contenido de N-nitrato a 0-60 cm de profundidad en función del contenido a profundidades menores de muestreo (A: 0-20 cm, B: 0-40 cm). Datos de 5 campañas (2012-2016) provistos por LABOR, EEA INTA Bordenave. En ambos casos, las líneas punteadas indican el intervalo de predicción.

características, encontraron que el contenido de nitrato a 0-60 cm resultó 2.35 veces mayor que el medido a 0-20 cm, tanto para el cultivo de trigo como el de girasol.

Para ejemplificar la diferencia en el poder predictivo de ambas regresiones, se presentan los intervalos de predicción calculados en base a la mediana de cada profundidad **(Tabla 2).** Puede notarse que el rango dentro del cual se encuentra el valor real del contenido de N-nitrato 0-60, es más estrecho cuando se utiliza la ecuación que involucra el estrato 0-40 cm respecto de cuando se utiliza la medida tomada a 0-20 cm.

Se concluye que, de no ser posible el muestreo de todo el estrato de interés (0-60 cm), el contenido de N-nitrato en la región SO de Buenos Aires puede ser estimado a partir del contenido de N-nitrato a 0-40 cm con un nivel de error relativamente aceptable. No obstante, para valores extremos, la predicción podría conducir a interpretaciones erróneas en el consejo de fertilización.

Bibliografía

Barbieri, P., H.E. Echeverría, y H.R. Sainz Rozas. 2009. Nitratos en el suelo a la siembra o al macollaje como diagnóstico de la nutrición nitrogenada en trigo en el sudeste bonaerense. Ciencia del Suelo 27:41-47.

Bono, A., y R. Alvarez. 2007. Estimación de nitratos en profundidad en suelos de la región semiárida y subhúmeda pampeana. Informaciones Agronómicas 33:25-26.

Di Rienzo, J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. González, M. Tablada., y C.W. Robledo. 2012. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL http://www.infostat.com.ar

Echeverría, H.E., y F.O. García. 2015. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. 2° ed. INTA Ediciones- Colección Investigación, desarrollo e innovación.

Ministerio de Agroindustria (MA). 2016. Sección estimaciones agrícolas. Resumen de campañas 2005/6-2015/6. Disponible en: www.agroindustria.gob.ar

Determinación de nitrato en laboratorio

Evaluación de la calidad del agua y del suelo regado en forma complementaria en la región pampeana argentina

Martín Torres Duggan[1, *], Carina R. Álvarez[2] y Helena Rimski Korsakov[2]

- *La calidad del agua de riego es un factor central para diagnosticar el riesgo de salinización y sodificación de suelos regados en forma complementaria.*
- *En la región pampeana, la salinización (incremento de la conductividad eléctrica (CE) del suelo regado en forma complementaria es muy leve pero se evidencia un efecto significativo sobre la sodicidad del suelo.*
- *La evaluación y monitoreo de propiedades edáficas sensibles y del rendimiento de los cultivos deberían ser la base agronómica para minimizar posibles impactos del riego complementario.*

Introducción

La mayoría de los sistemas de producción de granos de la Pampa Ondulada son en secano. A la vez, existen eventos de sequía estival más o menos severos en esta región (Maddonni, 2011). En este tipo de condiciones, el riego complementario incrementa marcadamente los rendimientos de los cultivos estabilizándolos en el tiempo (Pilatti et al., 2005; Torres Duggan et al., 2012). El riego complementario implica la aplicación de láminas inferiores a 300 mm año^{-1}, en forma fraccionada cuando la humedad del suelo se aleja del rango óptimo (Génova, 2011). En general, el momento de riego coincide con etapas fenológicas críticas para la determinación del rendimiento de los cultivos, como la floración y/o el llenado de granos. Los sistemas productivos que utilizan riego complementario aplican un amplio gradiente de láminas, que depende de las condiciones agro-ecológicas, cultivos y tipo de sistema de producción. En general, en los sistemas de producción de semillas es donde se presentan las mayores condiciones de intensificación en el uso del riego complementario debido a su mayor rentabilidad. A pesar de los significativos beneficios productivos y económicos del riego, es importante considerar los posibles impactos del mismo sobre las propiedades edáficas, para así poder prevenir y/o corregir eventuales procesos de deterioro de este recurso natural. Cuando el agua de riego es de mala calidad, por ejemplo, un elevado valor de relación de adsorción de sodio (RAS) – y/o contenido de sales pueden desencadenarse procesos de salinización y/o sodificación, que alteran la condición físico-química del suelo.

La salinización del suelo es el incremento de la concentración de sales en la zona radical en niveles que pueden afectar el crecimiento y rendimiento de los cultivos. Esto se debe al efecto osmótico, toxicidad de iones y/o deficiencias nutricionales derivadas del desbalance entre los diferentes iones. Generalmente, los procesos de salinización son más frecuentes en regiones áridas y semiáridas, en donde el riego es de tipo integral y la dinámica hídrica y salina está regulada por la calidad del agua aplicada (Lavado, 2009). Por otro lado, la sodificación del suelo se genera por el incremento en el contenido de sodio (Na) intercambiable (porcentaje de saturacion de sodio, PSI) del mismo, fuertemente asociado con el uso de aguas con alto RAS. La sodicidad es una problemática frecuente en sistemas de producción bajo riego complementario de zonas húmedas y sub-húmedas, donde los niveles de salinidad del suelo se mantienen bajos debido a la lixiviación generada por las lluvias (Sainato et al., 2006). La sodicidad provoca una serie de efectos, de los cuales los más severos son la degradación estructural del suelo. A esto se suma, la compactación excesiva causada por el tránsito de maquinarias pesadas con el suelo con baja capacidad portante debido a su mayor contenido hídrico. Es importante considerar los posibles impactos negativos del riego complementario sobre el suelo para generar un manejo sustentable de los agroecosistemas regados de la región pampeana. Los objetivos de este trabajo son: i) caracterizar la calidad del agua subterránea utilizada en riego complementario en la región, ii) determinar el efecto del riego complementario sobre la salinización y sodificación edáfica, iii) describir la problemática de la compactación en suelos regados en zonas húmedas y/o subhúmedas, y iv) brindar un marco conceptual y algunas recomendaciones prácticas para el monitoreo y manejo sustentable de suelos regados en forma complementaria.

Calidad del agua subterránea utilizada en riego complementario

En la región pampeana, los acuíferos más aprovechados para el riego son el Pampeano y el Puelche. La aptitud de uso del agua para riego se evalúa a través del análisis químico de muestras extraídas de las perforaciones utilizadas en los establecimientos y debería incluir las siguientes variables: pH, CE, cationes y aniones. A partir de estos análisis, se pueden calcular variables diagnósticas como el RAS. La mayor parte del agua de riego utilizada en la Pampa Ondulada proviene principalmente del acuífero

[1] Tecnología Agropecuaria. TECNOAGRO
[2] Universidad de Buenos Aires. FAUBA
[*] Autor de contacto. Correo electrónico: torresduggan@tecnoagro.com.ar

Puelche, cuyas aguas son bicarbonatadas sódicas y, por lo tanto, pueden conducir a procesos de salinización y/o sodificación de los suelos (Lavado, 2009).

Sistemas de clasificación de aguas

Las aguas de riego pueden ser clasificadas por su aptitud. Para las condiciones agro-ecológicas de la región pampeana y, específicamente para sistemas de riego complementario, se dispone de la propuesta del IPG-INTA (1999). En la **Tablas 1 y 2** se presenta la clasificación del agua de acuerdo a su salinidad (CE) y su riesgo de sodicidad (RAS).

Para las condiciones agro-ecológicas del área central de la provincia de Córdoba se dispone de una clasificación de aguas de referencia (Rampoldi et al., 2010). La misma considera como categorías de riesgo de salinización <1.4 dS m^{-1}; 1.4-2.5 dS m^{-1} y >2.5 dS m^{-1} como bajo, moderado y alto, respectivamente. Se puede apreciar que es algo más restrictiva que la clasificación del INTA (1999). Esto es de utilidad considerando las extensas superficies regadas de la provincia en áreas semiáridas, en donde es mayor la influencia de la calidad del agua de riego. En cuanto al riesgo de sodificación, la propuesta de clasificación considera el RAS ajustado como variable diagnóstica, teniendo en cuenta tres categorías sin diferenciar zonas y/o condiciones edafo-climáticas particulares (RAS ajustado <10; 10-15 y >15 para las categorías bajo, moderado y alto riesgo de sodificación, respectivamente).

Tabla 1. Clasificación de aguas de riego complementario de acuerdo a su salinidad determinada a través de su conductividad eléctrica (CE) (INTA, 1999).

	CE (dS m^{-1})
Aguas seguras	< 2
Aguas dudosas	2-4
Aguas riesgosas	> 4

Nota: se supone que la capa freática se encuentra por debajo de 3 m

¿Cómo es la calidad del agua que utilizan los productores regantes?

En la **Tablas 3 y 4** se presenta la calidad del agua de numerosas muestras y su clasificación según el riesgo de salinización y sodificación en riego complementario. Se puede observar una gran variabilidad según la escala (campo muestral) y región geográfica considerada. Debido a esta razón, es importante que cada establecimiento analice su situación particular y realice un monitoreo de la calidad del agua como base para definir la aptitud de uso de las mismas.

Impacto del riego complementario sobre la salinidad y sodicidad edáfica

Las sales que son aportadas por el riego pueden generar procesos de salinización y/o sodificación del suelo. Como se mencionó anteriormente, la salinización es frecuente en regiones áridas. Cuando el riego aporta cantidades significativas de Na (bicarbonatos) al suelo, puede ocurrir la sodificación del mismo. Este proceso consiste en el aumento del PSI, estrechamente vinculado con la

Tabla 2. Clasificación de aguas de riego complementario de acuerdo al riesgo de sodicidad evaluado a través de la relación de adsorción de sodio (RAS) para distintas zonas de la región pampeana (INTA, 1999). Se brindan características de las condiciones de evaluación.

Zona	Valor RAS del agua			Características de condiciones de evaluación
	Aceptable	Dudosa	Riesgosa	
SE Buenos Aires	< 15	15-20	> 20	6-7% MO, 25 a 26% de arcilla. Riego promedio: 70-160 mm $año^{-1}$
N Buenos Aires, SE Santa Fe y SO Entre Ríos	< 10	10-15	> 15	2,5-3% MO, 22 a 24% de arcilla. Riego promedio: 150-200 mm $año^{-1}$
NE Santa Fe	< 7	7-12	> 12	2% de MO, arcilla 26%, limo 70%. Riego promedio 150-300 mm $año^{-1}$
Centro S Córdoba	< 5	5-10	> 10	1,5%-2% de MO, textura franco limosa en superficie. Riego promedio: 200-350 mm $año^{-1}$

Tabla 3. Rangos de pH, conductividad eléctrica (CE) y relación de adsorción de sodio (RAS) de muestras de agua de distintos relevamientos realizados en la región pampeana.

Región	Nº de muestras	pH	CE dS m^{-1}	RAS
Región Pampeana (Génova, 2011)	66	7.30-7.65	0.66-3.40	2.2-24.1
Pampa Ondulada y Entre Ríos (Álvarez et al., 2016)	317-333	6.5-9.0	0.1-3.3	1-44
Córdoba (Rampoldi et al., 2010)	258	-	0-9	0-16*

*Notas: *RASaj*

Tabla 4. Porcentaje de muestras de agua sin riesgo o con riesgo (moderado y severo) de salinización o sodificación según distintos relevamientos realizados en la región pampeana.

Región	Nº de muestras	Salinización		Sodificación	
		Sin riesgo	Con riesgo	Sin riesgo	Con riesgo
		---------- % ----------		---------- % ----------	
Región Pampeana (Génova, 2011)	66	95	5	86	14
Pampa Ondulada y Entre Ríos (Álvarez et al., 2016)	300	87	13	43	57
Córdoba (Rampoldi et al., 2010)	258	82	18	89	11

*Notas: *RASaj*

calidad del agua de riego aplicada, en especial su RAS. La sodificación puede ocurrir tanto en regiones áridas o semiáridas como en zonas húmedas. Sin embargo, su diagnóstico y pronóstico es muy diferente en cada condición climática. En regiones áridas y semiáridas, donde los valores de CE edáficos son frecuentemente elevados, los límites críticos de PSI son más altos ya que la presencia de sales en la solución hace que el suelo se encuentra floculado (precipitado). Por lo tanto, hay un mayor margen para aportar Na sin que se produzcan efectos estructurales desfavorables. Por el contario, en regiones húmedas o sub-húmedas, las precipitaciones producen el lavado de sales durante el otoño, manteniendo bajos los niveles de CE del suelo (Génova, 2011). Cuando se utiliza agua de riego con altos valores de RAS, a igualdad de otros factores, se produce un incremento del PSI del suelo a expensas del desplazamiento del calcio o magnesio intercambiables adsorbidos en el complejo de cambio del suelo.

Los límites críticos de PSI considerados para definir a un suelo como "sódico" (PSI > 15%) fueron propuestos para regiones áridas y/o semiáridas donde los suelos presentan altos valores de CE. Por lo tanto, en regiones húmedas o sub-húmedas, donde se utiliza el riego complementario, los límites críticos pueden ser significativamente más bajos. En la **Figura 1** se muestran los resultados de un relevamiento de suelos con riego complementario en la Pampa Ondulada y Pampa Plana (coincidente con el centro y norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe), donde se realiza producción de semillas de maíz en lotes con prolongada historia de riego. Estos cultivos regados forman parte de rotaciones con cultivos no regados (dominantes en las rotaciones), principalmente soja y trigo.

El mayor efecto del riego complementario se evidencia en el incremento del PSI (sodicidad), mientras que el aumento de la CE, si bien resultó estadísticamente significativo, se mantuvo en niveles muy bajos y alejados de los umbrales críticos de salinidad. Del mismo modo, el aumento del pH fue leve, sin implicancias sobre la biodisponibilidad de los nutrientes.

Cuando se analiza la dinámica temporal de la salinidad y sodicidad de suelos regados en forma complementaria se evidencia un patrón de ascenso de los niveles de PSI durante la temporada de riego y un subsiguiente descenso

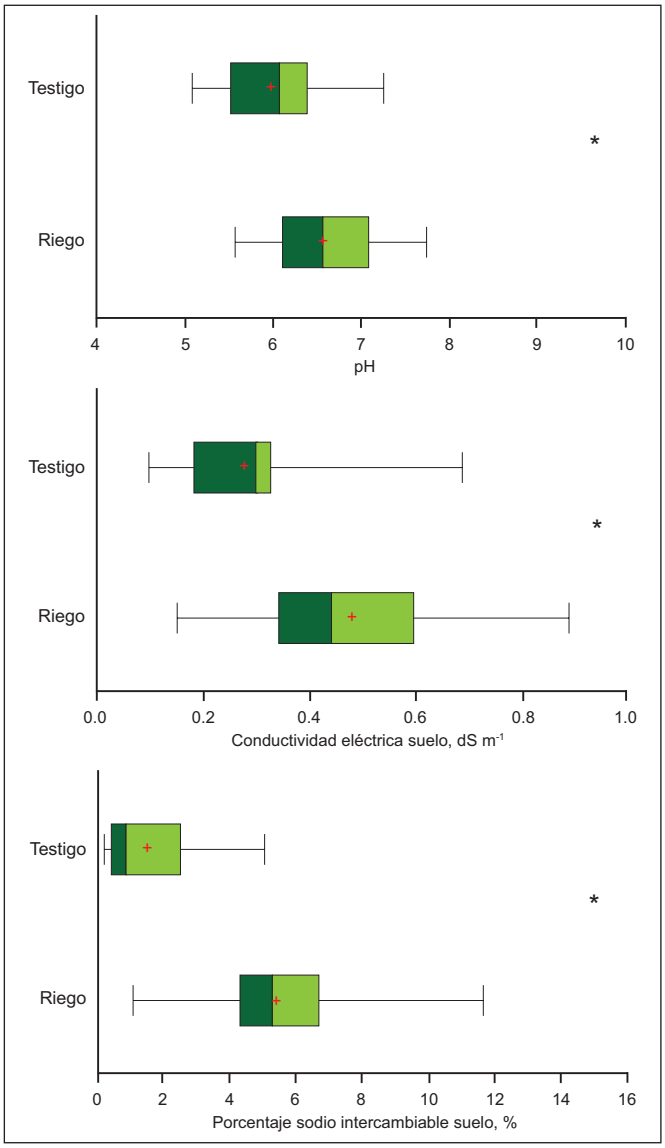

Figura 1. Gráficos de cajas (Boxplot) de los valores de pH, salinidad (CE) y sodicidad (PSI) de 0-20 cm de suelos regados en forma complementaria en la porción central de la región pampeana en relación al suelo no regado (testigo). Adaptado de Álvarez et al. (2016). Las líneas externas de las cajas representan los cuartiles 0.25 y 0.75, y la interna la mediana (0.50). Los extremos de las líneas horizontales representan los valores mínimos y máximos. Los signos "+" representan las medias de los tratamientos. Diferencias significativas entre las medias de los tratamientos: * (t-apareado; p < 0.05).

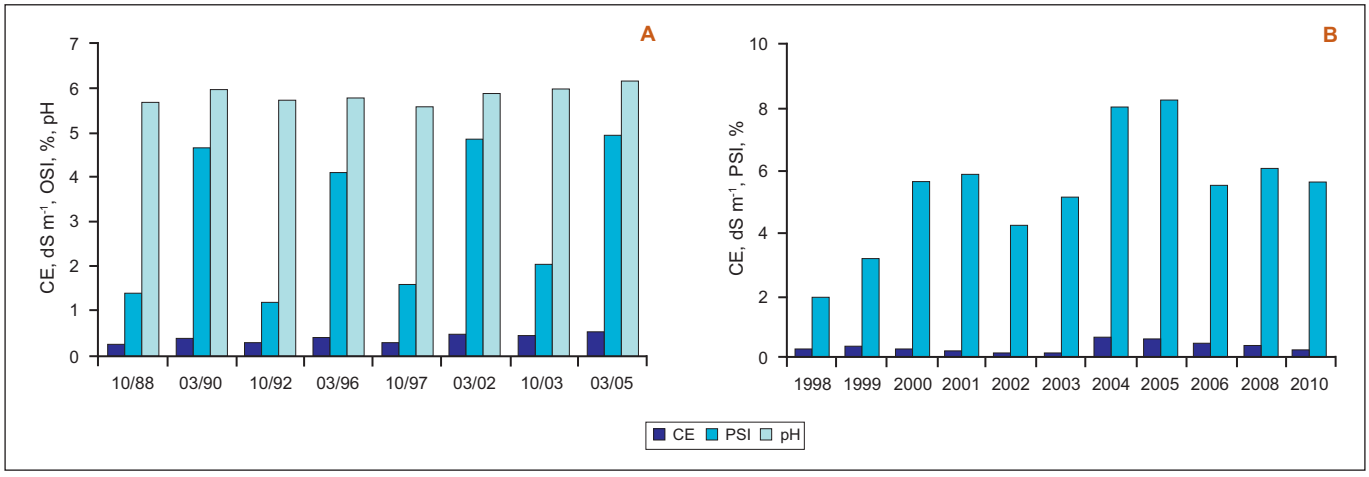

Figura 2. A. Patrón de variación temporal del conductividad eléctrica (CE), porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y pH en suelos regados integrando diversos sitios de la región (Génova, 2011). B. CE y PSI evaluados en un suelo con prolongada historia de riego complementario en sistemas de producción de maíz y alta intensificación de uso del riego (datos no publicados).

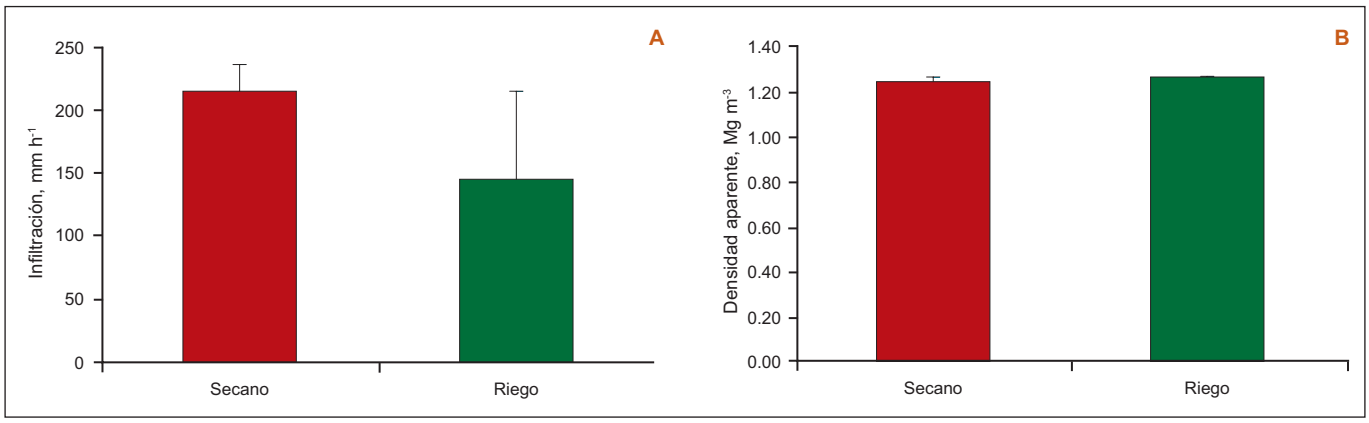

Figura 3. A. Tasa de infiltración en secano y riego. B. Densidad aparente (estrato 0-5 cm) en secano y riego. Las barras indican el error estándar. Fuente: Torres Duggan et al. (2012).

provocado por las lluvias y la capacidad de recuperación del suelo asociadas con su capacidad de intercambio de cationes (Génova, 2011). Por el contario, la CE presenta pocas fluctuaciones a través del tiempo y se mantiene en niveles bajos **(Figura 2)**.

El patrón de ascenso y descenso del PSI se observa en cualquier suelo regado en forma complementaria, pero su dinámica puede ser diferente como así también los niveles de PSI alcanzados. Algunos trabajos indican que no se presenta acumulación sódica (**Figura 2A**; Génova 2011), mientras que otros estudios (datos no publicados) muestran un patrón con fases o subfases de acumulación sódica **(Figura 2B)**. Como se mencionó antes, el PSI es un indicador del riesgo de sodificación del suelo, pero no permite determinar *per se*, si hay procesos de degradación física del mismo. Por consiguiente, no permite establecer de un modo categórico la sustentabilidad o no de la práctica del riego complementario considerando solamente dicho índice.

Impacto del riego complementario sobre la calidad física edáfica

La tasa de infiltración del agua en el suelo puede ser afectada por la práctica del riego en la región pampeana, aún en suelos con niveles de PSI "bajos" o "moderados" si se consideran los límites críticos de sodicidad válidos para regiones áridas (Andriulo et al., 1998; Pilatti et al., 2005; Mon et al., 2007; Torres Duggan et al., 2012). Los resultados obtenidos en el área de estudio son dispares. Por un lado, en un estudio realizado en el sur de Santa Fe, sobre un suelo con 13 años de historia de riego complementario con agua de categoría «riesgosa» en relación al RAS y «segura» por su CE según la clasificacion de INTA (1999), y manejado en siembra directa (pH = 7.0; CE = 0.58 dS m^{-1}; PSI = 6.7%; MOT = 4%), no se observó una reducción estadísticamente significativa en la tasa de infiltración (Torres Duggan et al., 2012; **Figura 3A**). La ausencia de diferencia en la tasa de infiltración (metodología USDA) es coincidente con lo reportado en una amplia red de experimentos efectuadas en el sudeste de Buenos Aires en sistemas de siembra directa, donde no se detectaron impactos significativos del riego sobre la conductividad hidráulica no saturada (Costa y Aparicio, 2008). En contraste con estos resultados, otras experiencias muestran una importante disminución de la tasa de infiltración bajo riego en suelos laboreados (Andriulo et al., 1998; Costa y Aparicio, 2008).

En el trabajo de Torres Duggan et al. (2012), la densidad aparente del suelo regado no difirió estadísticamente

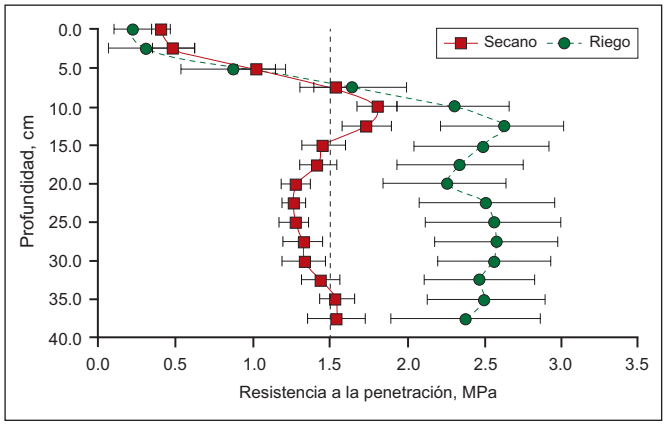

Figura 4. Perfil de distribución de la resistencia a la penetración en el estrato de 0-40 cm. Serie de suelo: Venado Tuerto. Fuente: datos no publicados. La línea roja indica el límite de resistencia a la penetración de 1.5 MPa.

del testigo (secano) **(Figura 3B)**. Los valores de densidad aparente se ubicaron en valores esperables según la textura del suelo y coinciden con los generalmente observados en el área de estudio (Álvarez et al., 2009).

La inestabilidad estructural medida en el estudio de Torres Duggan et al. (2012) fue estadísticamente menor en riego, pero la diferencia fue mínima. En ambos tratamientos, la inestabilidad estructural fue baja (riego = 0.52 mm; secano = 0.6 mm), valores frecuentes bajo siembra directa (Álvarez et al., 2009). Los valores bajos de inestabilidad observados podrían vincularse con el manejo en siembra directa. En el tratamiento regado, la mínima disminución de la inestabilidad observada puede relacionarse con la presencia de bloques angulares moderados a fuertes, comparado con secano donde la estructura era granular o migajosa. Estas diferencias estructurales observables a simple vista concuerdan con las distintas resistencias a la penetración observada bajo riego. En la **Figura 4** se presentan los resultados de otro experimento de campo efectuado sobre un suelo regado en forma complementaria perteneciente a la serie Venado Tuerto donde se evaluó el perfil de resistencia mecánica en riego y secano. Ambos tratamientos presentaban igual contenido de humedad.

Se observó una mayor resistencia a la penetración media y mayor variabilidad en riego que en secano. La resistencia a la penetración media de la capa 0-40 cm bajo riego superó en 56% a la medida en el área de secano. Las mayores diferencias en resistencia mecánica entre ambientes regados y de secano, se observaron a partir de los 10 cm de profundidad. El promedio de resistencia mecánica en la capa de 0-40 cm en los suelos fue superior al umbral de 1.5 MPa reportado por la literatura, a partir del cual se verifica un 50% de reducción del crecimiento de las raíces de maíz. Podemos concluir a partir de este trabajo y de otros realizados por diferentes autores, que la resistencia mecánica es una variable sensible para diagnosticar situaciones de compactación/endurecimiento y los efectos del manejo sobre la condición física edáfica (Álvarez et al., 2009; Álvarez, 2013).

Bases para la evaluación y monitoreo de suelos regados en forma complementaria

El monitoreo de la calidad del suelo bajo riego incluye la evaluación de la calidad del agua, de la salinidad (CE) y sodicidad del suelo (PSI) y la caracterización visual de la condición física. A ello pueden sumarse valoraciones cuantitativas de la calidad física como resistencia a la penetración e infiltración, para tener un panorama más completo.

Si bien hay una dinámica de incremento y reducción de los niveles de PSI en post y pre-temporada de riego, respectivamente, los efectos sobre la dinámica estructural del suelo pueden seguir afectando a los cultivos posteriores al cultivo regado. Este aspecto debe ser considerado en el monitoreo integral de los agro-ecosistemas en donde se aplica riego complementario. En la **Figura 5** se muestra un esquema conceptual para el diagnóstico de la calidad de suelos regados en forma complementaria, cuya finalidad es aportar criterios simples y prácticos que permitan mejorar la sustentabilidad de los agro-ecosistemas regados. El modelo plantea dos profundidades de muestreo: una superficial, que permite caracterizar el problema de infiltración, y otra a mayor profundidad, que permite detectar problemas de compactación.

Las prácticas de manejo a implementar tanto para prevenir como para corregir procesos de degradación de suelos regados en forma complementaria, deben ser establecidas en base a la información experimental local y a principios de buenas prácticas agrícolas en ambientes regados **(Tabla 5)**.

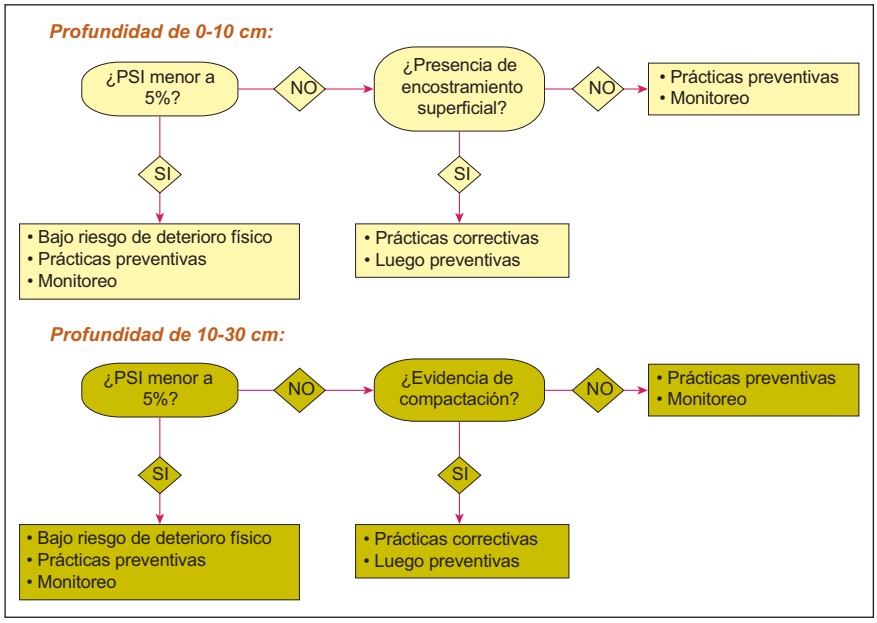

Figura 5. Esquema conceptual para el diagnóstico de la condición de calidad de suelos regados en forma complementaria. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Criterios y acciones para el diagnóstico, prevención y corrección de procesos de deterioro de la condición física edáfica en suelos regados en forma complementaria.

Contexto	Prácticas recomendadas
Diagnóstico	Análisis de suelos y seguimiento de variables de interés: pH, CE, MO, CIC, cationes. Cálculo del PSI.
	Análisis de aguas: pH, CE, aniones, cationes. Cálculo del RAS y RAS ajustado.
	Observación del perfil (estructura, presencia de costras, entre otras).
	Evaluación de la condición física (infiltración, resistencia mecánica, entre otras).
Prevención	Ajuste de láminas de riego según necesidad real.
	Evitar la compactación por tránsito de maquinaria durante labores culturales y de cosecha.
	Rotación con gramíneas y cultivos de cobertura.
Corrección	Reducción de láminas de riego o suspensión temporaria del riego.
	Aplicación de enmiendas minerales y orgánicas.
	Remoción mecánica de costras y/o zonas compactadas mediante implementos que no remuevan o alteren la cobertura (por ejemplo paratill/paraplow).

Respecto del muestreo del suelo, si el lote es homogéneo se recomienda tomar 10-15 submuestras sobre una diagonal para realizar una muestra compuesta. Esta muestra se enviará al laboratorio para su análisis. Las esquinas del lote sin regar pueden ser utilizadas como áreas de referencia (secano). Si el lote no es homogéneo, las estaciones de muestreo se deben establecer en las distintas zonas representativas del lote. Para ello, idealmente es importante disponer de información de suelos a escala de detalle (por ejemplo mapas básicos de suelos) y también información topográfica, como para facilitar la selección de los sitios de muestreo.

A modo de conclusión

- La calidad del agua de riego es un factor central para diagnosticar el riesgo de salinización y sodificación de suelos regados en forma complementaria. En regiones húmedas y subhúmedas, como las que dominan en los agro-ecosistemas en donde se aplica el riego complementario, se deben utilizar sistemas de clasificación de aptitud de aguas específicas para la región pampeana. Si bien la propuesta del INTA (1999) es preliminar y requiere de un mayor grado de validación y desarrollo, es un valioso marco de referencia para evaluar la calidad del agua de riego en este tipo de sistemas de producción

- La información experimental disponible en la región pampeana, indica que, en general, la salinización (incremento de la CE) del suelo regado en forma complementaria es muy leve y la CE se mantiene en valores muy bajos, no limitantes del crecimiento y/o rendimiento de los cultivos. Por el contrario, hay evidencias de un efecto significativo del riego complementario sobre la sodicidad del suelo, mostrando un característico patrón ascendente del PSI luego de la temporada del riego, y un subsiguiente descenso.

- Se dispone de información experimental que indica que, aún con bajos niveles de PSI del suelo, se evidencian procesos de degradación física tales como caídas en la tasa de infiltración y/o procesos de encostramiento superficial y/o aumento de la resistencia a la penetración. Asimismo, al aporte de Na al sistema se suma la compactación de suelos derivada del tránsito, agravando el deterioro de la calidad física con efectos directos sobre el crecimiento de los cultivos.

- El manejo sustentable de suelos regados en forma complementaria requiere de la aplicación un modelo conceptual específico para el diagnóstico y manejo de limitaciones de fertilidad en ambientes húmedos de la región pampeana. En este sentido, la evaluación y monitoreo de propiedades edáficas sensibles y del rendimiento de los cultivos deberían ser la base agronómica para minimizar posibles impactos del riego complementario, y de esta manera, maximizar la sustentabilidad de los agro-ecosistemas.

Bibliografía

Álvarez, C.R., M.A. Taboada, F.H. Gutiérrez Boem, A. Bono, P.L. Fernández, y P. Prystupa. 2009. Topsoil properties as affected by tillage systems in the Rolling Pampa region of Argentina. Soil Science Society of America Journal 73: 1242-1250.

Álvarez, C.R. 2013. Condición física de los suelos limosos bajo siembra directa: caracterización, génesis y manejo. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica (IAH) 10. Junio. IPNI. 8 p.

Álvarez, C.R., H. Rimski Korsakov, y M. Torres Duggan. 2016. Calidad de agua e impacto del riego complementario en la Región Pampeana. Actas del XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. G. Cholaky y J.M. Cisneros (compiladores). Editorial Unirio. 278 p.

Andriulo, A., M.L. Galetto, C. Ferreira, G. Cordone, y C. Sasal. 1998. Efecto de 11 Años de riego complementario sobre un Argiudol típico Pampeano. Ciencia del Suelo 16:125-127.

Costa, J.L., y V. Aparicio. 2008. Evaluación de propiedades químicas y físicas en lotes con pivote central en el sudeste de la provincia de Buenos Aires. Actas del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.

Génova, L.J. 2011. Calidad del agua subterránea para riego complementario en la Pampa Húmeda argentina. Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata. 119:63-81 .

INTA. 1999. Recomendaciones para la utilización de aguas para riego en función de su calidad, síntesis de los trabajos realizados en las unidades del INTA-IPG. Seminario de capacitación. Impacto ambiental del riego complementario. Pergamino, Argentina. 87 p.

Lavado, R.S. 2009. Salinización y sodificación de suelos de producción agrícola extensiva por riego complementario. En: Alteraciones de la fertilidad de los suelos. Taboada, M.A. y Lavado, R.S (Editores). Editorial FAUBA. 163 p.

Maddonni, G. 2011. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural región of Argentina, a probabilistic approach. Theoretical and Applied Climatology. 21 p.

Mon, R., C. Irurtia, F.G. Botta, O. Pozzolo, F. Bellora Melcón, D. Rivero, y M. Bomben. 2007. Effects of supplementary irrigation on chemical and physical soil properties in the rolling pamparegión of Argentina. Ciencia e investigación agraria. 34:143-150.

Pilatti, M.A., S. Imhoff, P. Ghiberto, y R. Marano. 2005 Changes in some physical properties of Mollisols induced by supplemental irrigation. Geoderma 133 (2006) 431-443.

Rampoldi, E.A., M. Boccardo, C. Álvarez, E. Martelloto, A.I. Salinas, E.F. Lovera, J.P. Giubergia, y V. Bustos. 2010. Calidad de las aguas subterráneas utilizados para riego suplementario en la provincia de Córdoba. INTA Manfredi. 20 p.

Sainato, C., G. Galindo y O.S. Heredia. 2006. Agua subterránea: Explotación y su utilización agropecuaria. 1 ed. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Editorial Facultad de Agronomía. 115 p.

Torres Duggan, M., C.R. Álvarez, M.A. Taboada, T. Celesti, F. Vignarolli, y D. D'ambrosio. 2012. Riego complementario en un Argiudol típico de la Pampa Ondulada argentina bajo siembra directa: efectos sobre algunas propiedades químicas y físicas. Ciencia del Suelo 30:201:207.

Curvas de acumulación de nitrógeno, fósforo y potasio en lechuga (*Lactuca sativa* L.) cv. Coolward cultivada en invernadero en México

Anacleto Sosa Baldivia[1,5], Guadalupe Ruíz Ibarra[2], Juliana Padilla Cuevas[3], Jorge D. Etchevers Barra[3], Javier Z. Castellanos Ramos[4], y Raul Rene Robles de la Torre[5]

Introducción

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) es una hortaliza que por su ciclo corto y dinámica de crecimiento poco común requiere precaución al momento de realizar su fertilización (Maroto, 1990). Esto se asocia a que en su etapa de plántula puede sufrir daños por toxicidad de fertilizantes (Kamata, 1969), y un mal manejo de su fertilización nitrogenada, además de reducir su rendimiento y calidad, puede incrementar el contenido de nitratos en las hojas los cuales son nocivos para el hombre (Libert y Franceschi, 1987). De acuerdo con Welch et al. (1983), la lechuga requiere un suministro adecuado de nutrientes en el último tercio de su ciclo para su óptimo crecimiento ya que 60% de sus requerimientos nutricionales son cubiertos en este periodo. Por otro lado, la baja eficiencia de la lechuga para recuperar los nutrientes aplicados vía fertilización (Sosa, 2007), a la par de que los agricultores aplican altas dosis de fertilización cuando su crecimiento es todavía lento (Costigan, 1987; Gardner y Pew, 1979), conduce a que grandes cantidades de nitrógeno (N) se pierdan por lixiviación y desnitrificación (Pritchard et al., 1995) y se contaminen con nitratos los acuíferos (Castellanos et al., 1999; Fontes et al., 1997). Una práctica que se utiliza para mejorar la eficiencia de los cultivos para absorber los nutrientes que se aplican al suelo es fraccionar la fertilización, y para realizar la curva de acumulación nutrimental es la mejor herramienta (Bugarin-Montoya et al., 2011; Bertsch, 2005; Castellanos, 1997; Zink y Yamaguchi, 1962).

Considerando la relevancia de esta información, desde hace 55 años varios investigadores se han dedicado a establecer el patrón de acumulación nutrimental de los cultivos hortícolas de mayor interés antropocéntrico entre de los que se incluye la zanahoria (Sosa et al., 2013; Evers, 1988), brócoli, (Castellanos et al., 1999), pepino (Honorato et al., 1993; Ward, 1967), tomate (Tapia y Gutiérrez 1997), chile (Burgueño, 1994), melón (Tyler y Lorenz, 1964), cebolla (Duque et al., 1983; Zink, 1966), ajo (Bertoni et al., 1988; Zink 1963), fresa (May et al., 1994), sandia (Villalobos y Salas, 2012), pimiento morrón (Valle, 2010), apio (Rincón et al., 2002), calabacita (Rodas-Gaitán et al., 2012) y rábano (Sosa, 2007). Con relación al

[1] Investigador de Amway-Nutrilite S. de R.L. Rancho el Petacal Jalisco, México
[2] Profesor del Instituto Tecnológico Superior de Tamazula de Gordiano Jalisco, México
[3] Profesor del Colegio de Postgraduados, Montecillos Estado de México, México
[4] Director del Laboratorio Fertilab, Celaya Guanajuato, México
[5] Profesor de CIBA-IPN, Campus Tlaxcala México
[*] Autor de contacto. Correo electrónico: anacleto.sosa@amway.com

cultivo de lechuga, aun cuando su curva de acumulación nutrimental ya fue generada (Zink y Yamaguchi, 1962; Rincón, 2004), esta podría no ser extrapolable a las condiciones de México, ya que se desarrollaron en ambientes diferentes. Con base en lo anterior, el objetivo de este estudio fue determinar la dinámica de crecimiento y el ritmo de absorción de N, fósforo (P) y potasio (K) en lechuga cultivada bajo invernadero en México.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en el invernadero del área de Edafología de la Universidad Autónoma de Chapingo (Texcoco, Estado de México). Se utilizó un suelo limo arenoso colectado en la ribera de un canal de irrigación ubicado en el Colegio de Postgraduados, (Montecillos, Estado de México), el cual presentó pH 6.5, 4.5% de materia orgánica, 0.28% de N total, 35 ppm de P-Olsen y 960 ppm de K-intercambiable. Antes de establecer el experimento, a este sustrato se le aplicó una fertilización basal de 400, 100 y 200 mg de N, P y K kg^{-1} de suelo seco, así como una mezcla de micronutrientes [3.0 mg de magnesio, hierro, manganeso y zinc; 1.0 mg de cobre; y 0.3 mg de boro kg^{-1} de suelo seco]. Las fuentes fertilizantes utilizadas fueron urea, superfosfato de calcio triple, sulfato de K, Mg, Fe, Mn y Cu y borato de sodio (11% B). Esta fertilización es la que el NFDC (1976) recomienda para evaluar el rendimiento de los cultivos bajo condiciones no limitantes bajo invernadero. Se sembró el cultivar Coolward en charolas (o bandejas) de unicel de 200 cavidades y 12 días después de la emergencia (DDE), las plántulas se trasplantaron a macetas de polietileno. El tamaño y número de macetas por unidad experimental fue función de la etapa fenológica en la que se realizó el muestreo **(Tabla 1)**. En el invernadero, las macetas fueron distribuidas al azar utilizando tres repeticiones.

El riego de las plantas de lechuga cultivadas en macetas se realizó manualmente dos veces al día. La temperatura promedio en el invernadero durante el periodo que se condujo el experimento fue 22 °C con un valor mínimo y máximo de 17 y 27 °C, respectivamente. Desde los once DDE y hasta la madurez comercial del cultivo se realizaron nueve muestreos de acuerdo a la escala fenológica propuesta por Huerres y Caraballo (1988). En cada muestreo, las plantas cosechadas se dividieron en porción aérea (PA) y radical (PR) y se determinó su materia seca (MS), secándolas en una estufa con circulación forzada de aire a 70 °C durante 24 h. Las muestras se molieron y analizaron para determinar la concentración de N, P y K. Se analizó el N usando un equipo de digestión semimicro Kjeldahl modificado para incluir nitratos (Bremner, 1965). Para analizar P y K se realizó una digestión húmeda usando una mezcla de ácido nítrico (HNO_3) y perclórico ($HClO_4$) en una relación 3:1. El P se evaluó con el método del fosfovanadomolibdato (Jackson, 1976) y el K fue medido en un equipo de emisión atómica. Con el peso seco y la concentración de N, P y K, se calculó la acumulación de nutrientes de la PA, PR, y Biomasa Total (BT) y a partir de esta información se construyeron las curvas de acumulación de biomasa y nutrientes expresadas en valores relativos. El valor 100 se asignó a la cantidad total acumulada de MS, N, P y K al momento de la cosecha del cultivo. El índice de cosecha se estimó dividiendo la MS acumulada en la PA entre la BT acumulada en la planta entera. La relación PA:PR se calculó dividiendo la MS acumulada en la PA entre la MS acumulada en el sistema radical de la planta.

Resultados y discusión

Curva de acumulación de biomasa

En la **Figura 1**, se presenta la acumulación relativa de MS en PA, PR y total durante el ciclo de la lechuga cv. Coolward (0-65 DDE) cultivada en invernadero. Los valores relativos se calcularon con base en la información de la **Tabla 2** y el 100% se asignó a la BT acumulada en madurez comercial (MC) (35 060 mg $planta^{-1}$).

Tabla 1. Macetas por unidad experimental, cantidad de suelo por maceta y plantas por maceta en cada muestreo.

Muestreo	DDE	Etapa fenológica*	Macetas unidad $experimental^{-1}$	kg de suelo $maceta^{-1}$	Planta $maceta^{-1}$
1	11	2 hojas (V2)	5	0.5	5
2	17	4 hojas (V4)	4	1.5	4
3	24	6 hojas (V6)	3	2	3
4	29	8 hojas (V8)	3	4	3
5	35	IFRO	1	8	2
6	43	IFRE	1	12	2
7	50	CRE1	1	12	2
8	57	CRE2	1	12	2
9	65	MC	1	12	2

** Escala fenológica según Huerres y Caraballo (1988). IFRO = Inicio de formación de la roseta; IFRE = Inicio de formación del repollo. CRE1 y CRE2: 30 y 60% del crecimiento del repollo; MC = Madurez comercial; DDE = Días después de la emergencia. Se utilizaron tres repeticiones por unidad experimental.*

En los primeros 24 DDE (V0-V6), la acumulación de MS fue baja (0.5% de la BT en MC), acumulándose casi totalmente (95%) en la PA. Entre los 24 y 35 DDE (V6-IFRO), la planta produjo 8% de la BT final, con 78% en la PA y 22% en la PR de la planta. Esto resultó en un descenso en la relación PA:PR (3 en promedio), que se asoció a un mayor crecimiento de raíces entre la etapa V4 y V6. Según Gardner et al. (1985), con esta estrategia la planta asegura el adecuado suministro de agua y nutrientes en su fase de crecimiento rápido. La acumulación linear de MS comenzó a los 35 DDE (IFRO) y continuó hasta la MC (65 DDE). En este periodo se produjo 81% de la MS total, la mayor parte de la cual se incorporó en la PA, primero para formar las hojas de roseta y después las del repollo; como resultado de esto, el IC y la relación PA:PR en MC fue 0.90 y 8.4, respectivamente. Estos resultados son congruentes con los reportados por Seginer (2003) en Inglaterra, Rincón (2004) en España y Doerge et al., (1992) en EE.UU., sugiriendo que, cuando la lechuga recibe una nutrición balanceada, tales parámetros fisiológicos son independientes del sistema de producción y la localidad, coincidiendo con lo que afirman Etchevers et al. (1991) y Sosa et al. (2015). La MS acumulada en la PA en los últimos 22 días antes de la cosecha fue 25 560 mg planta^{-1} (64% de la BT acumulada) y se utilizó principalmente para formar las hojas del repollo; por lo tanto, al finalizar el ciclo del cultivo 90% de la BT (31 490 mg planta^{-1}) se acumuló en la PA (roseta y repollo), lo que concuerda con lo reportado por Heinen et al. (1991) y Huett y Dettmann (1991).

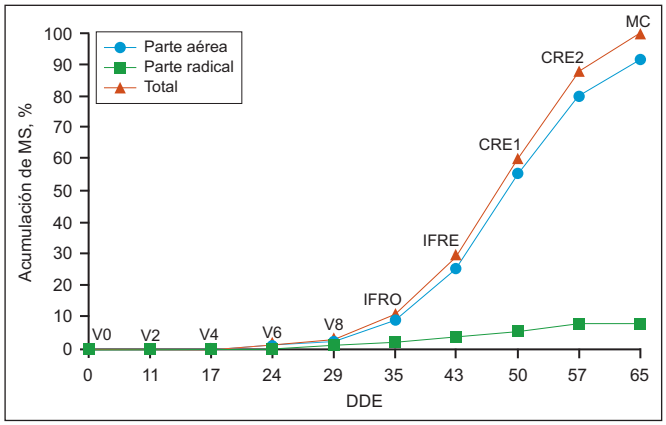

Figura 1. Curva de acumulación de materia seca (MS) biomasa en porción aérea (PA), porción radical (PR) y total en lechuga cv. Coolward cultivada en invernadero.

Absorción de N, P y K

En la **Figura 2** se presenta la acumulación relativa de N, P y K en la PA y PR en diferentes estadios fenológicos de la lechuga calculada con base en la información de la **Tabla 3**.

Como se puede apreciar, la acumulación nutrimental en los primeros 24 DDE (V0-V6) fue baja, equivalente a sólo 1% de los requerimientos totales de N, P y K (11.1, 1.2 y 12.4 mg planta^{-1} de N, P y K, respectivamente) **(Tabla 3)**. Después del estadio V6, la acumulación nutrimental se incrementó y las cantidades de N, P y K absorbidas se incorporaron principalmente en la PA. La alta cantidad de nutrientes presentes en la PA entre los estados V6 e IFRO se asoció con la cantidad de BT acumulada **(Tabla 2)** ya que la concentración N, P y K durante este periodo tendió a disminuir **(Tabla 3)**. A partir de la etapa de IFRE y hasta la MC (22 días), se acumularon 1,012, 107 y 1,016 mg N, P y K en la planta (72, 65 y 66% del N, P y K total absorbido), de los cuales, 948, 97 y 923 mg N, P y K se encontraron en la PA y 64, 10 y 93 mg N, P y K en la PR (casi 90 y 10% del N, P y K total acumulado, respectivamente). En MC del N, P y K total acumulado en lechuga, 92, 87 y 88% fue incorporado en la PA y el resto (8, 13 y 12% del N, P y K, respectivamente) en la PR. La curva de acumulación generada para N indica que la fertilización nitrogenada de lechuga debe fraccionarse durante su ciclo de cultivo. Debido a que en los primeros 24 DDE la acumulación de MS y N en esta especie es baja, es recomendable que hasta antes del trasplante la dosis

Tabla 2. Acumulación de materia seca en porción aérea, radical y total en lechuga cv. Coolward cultivada en invernadero.

DDE	Etapa*	Porción aérea	Porción radical	Biomasa total	Relación PA:PR	IC
		---------- mg materia seca planta^{-1} ----------				
11	V2	6 (1)	1 (0.3)	7 (1.3)	6	0.83
17	V4	30 (2)	5 (0.7)	35 (2.7)	6	0.86
24	V6	170 (7)	10 (1)	180 (8)	17	0.95
29	V8	560 (57)	240 (9)	800 (66)	2	0.70
35	IFRO	2350 (72)	680 (21)	3030 (93)	4	0.85
43	IFRE	8030 (115)	1470 (120)	9500 (235)	6	0.85
50	CRE1	17 960 (345)	2140 (73)	20 100 (418	8	0.89
57	CRE2	26 140 (54)	3370 (32)	29 510 (86)	8	0.89
65	MC	31 490 (348)	3580 151)	35 060 (499)	8	0.90

** Escala fenológica según Huerres y Caraballo (1988). V2, V4, V6 y V8 = Dos, cuatro, seis y ocho hojas, respectivamente; IFRO = Inicio de formación de la roseta; IFRE = Inicio de formación del repollo. CRE1 y CR2: 30 y 60% del crecimiento del repollo; MC = Madurez comercial; DDE = Días después de la emergencia. Los valores entre paréntesis corresponden a las desviaciones estándar (n = 3).*

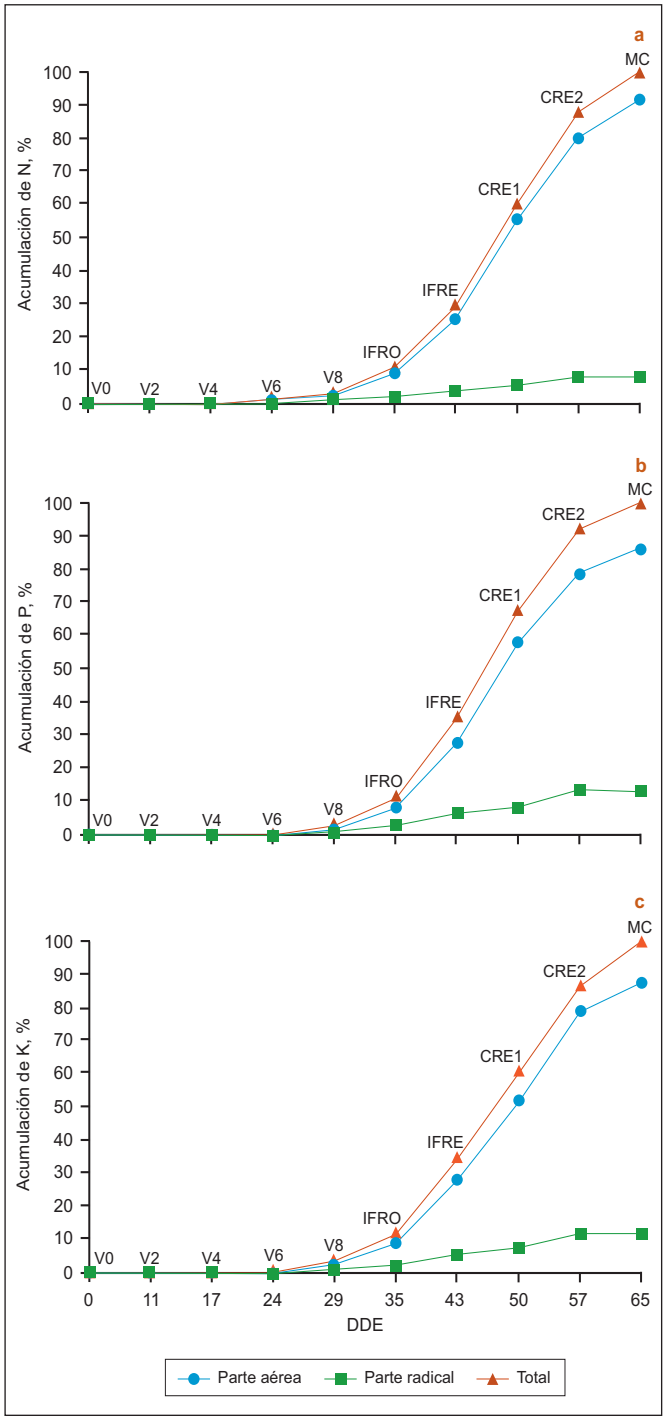

Figura 2. Acumulación relativa de N (a), P (b) y K (c) en porción aérea (PA), porción radical (PR) y total en lechuga cv. Coolward cultivada en invernadero.

de N a aplicar sea a lo mucho un tercio de la dosis total, el fertilizar con dosis altas en esta etapa no se justifica ya que por su alta dinámica y movilidad se estaría exponiendo el N del fertilizante a reacciones de inmovilización y desnitrificación; así como a su perdida por lixiviación en el suelo (Barber y Silberbush 1984). Ante esta situación, la fertilización nitrogenada en lechuga debe fraccionarse de tal manera que se asegure una alta disponibilidad de N en su periodo de crecimiento rápido el cual ocurre entre el IFRO y CRE2. Para lograr esto, una alta proporción de la dosis se debe suministrar en la etapa V8 que es cuando comienza a aumentar la demanda de N, con esto se asegura un adecuado suministro de N en los últimos 22 días de su ciclo que es cuando la lechuga absorbe 72% de sus requerimientos totales de N. Estos resultados son congruentes con lo reportado por Welch et al. (1983) en California, EE.UU. El punto de inflexión en la curva de demanda de N ocurrió en la etapa de CRE2 (57 DDE); esto indica que la absorción de N en esta especie comienza a reducirse en esta etapa y su aplicación, tal como lo señala Seginer (2003), debe finalizar al menos siete días antes de la cosecha. La aplicación de N después de que el repollo ha alcanzado el 60% de su tamaño final no mejora la productividad del cultivo y sólo incrementa del costo de producción (Murakami et al. 2002; Broadley et al. 2003; Gardner y Pew 1979; Prichard et al., 1995), la acumulación de nitratos en el repollo (Seginer 2003) y el riesgo de contaminación de los acuíferos (Castellanos et al., 1999; Fontes et al., 1997). El patrón de acumulación de P y K determinado en este estudio fue similar al del N; no obstante, por la escasa movilidad del P (Barber y Silberbush, 1984; Lawton y Vomocil 1954) y del K en el suelo (Fassbender. y Bornemisza, 1987), en caso de ser necesario fertilizar con estos dos nutrientes lo más recomendable es aplicarlos antes de establecer el cultivo en campo tal como lo recomiendan Nagata et al. (1992) en Florida y Zink y Yamaguchi (1962) en California, EE.UU. Estos investigadores determinaron que la mejor opción para fertilizar a la lechuga con P y K es justo al momento de su trasplante realizando su aplicación en banda.

Conclusiones

En los primeros 35 DDE, que representan el 54% de la duración ciclo del cultivo (V0-IFRO), la lechuga solo acumuló 12% de su demanda total de N, P y K. La rápida acumulación de biomasa y nutrientes ocurrió 22 días antes de la cosecha, cuando más del 60% de los requerimientos totales de N, P y K fueron acumulados. Esto indica que entre el IFRO e IFRE de la lechuga, se debe poner especial atención en su nutrición a fin de asegurar su alto potencial productivo. La curva de acumulación de N indica que para mejorar la eficiencia de la lechuga para recuperar el N derivado del fertilizante, su dosis debe fraccionarse de tal manera que una alta proporción coincida con el periodo de máxima demanda el cual ocurre entre IFRO y CRE2. En contraste, considerando el ciclo corto de la lechuga (< 70 días) y la baja movilidad del P y K en el suelo, la fertilización fosfatada y potásica debe realizarse antes del trasplante.

Bibliografía

Barber, S. A. y M. Silberbush. 1984. Root nutrient, water influx, and plant growth. In: S.A. Barber, and D.R. Bouldin (Editors). Plant root morphology and nutrient uptake. Soil Science Society of America. Madison, WI, USA. 65-87. Lettuce and spinach.

Bertsch, F. 2005. Estudios de absorción de nutrientes como apoyo de recomendaciones de fertilización. Informaciones Agronómicas. 57:1-10. IPNI Norte de Latinoamérica. Quito, Ecuador.

Bertoni, G., P. Morard, y L. Espagnacq. 1988. Dynamique de l'absorption des elements mineraux chez l'ail (*Allium sativum* L). Agrochimica 32:518-530.

Bremner, J. M. 1965. Nitrogen availability indexes. In: C. A. Black (Editor). Methods of soil analysis, part 2. ASA. Madison, WI, USA. 1324-1345.

Tabla 3. Concentración de nitrógeno, fósforo, y potasio y su acumulación en porción aérea y radical de lechuga cv. Coolward cultivada en invernadero.

DDE	Etapa*	Concentración nutrimental		Acumulación nutrimental		
		PA	PR	PA	PR	Total
		(%)		(mg planta^{-1})		
			Nitrógeno			
11	V2	5.1 (0.2)	4.1 (3.1)	0.3 (0.1)	0.1 (0.03)	0.4 (0.13)
17	V4	6.3 (0.1)	3.8 (0.1)	2 (0.3)	0.2 (0.03)	2.2 (0.33)
24	V6	6.5 (0.2)	3.6 (0.1)	11 (1)	0.3 (0.1)	11.3 (1)
29	V8	5.9 (0.2)	3.4 (0.2)	33 (3)	8 (1)	41 (4)
35	IFRO	5.3 (0.2)	3.4 (0.1)	124 (7)	23 (2)	147 (9)
43	IFRE	4.4 (0.1)	3.4 (0.2)	352 (10)	49 (3)	401 (13)
50	CRE1	4.4 (0.1)	3.3 (0.1)	782 (30)	72 (5)	853 (35)
57	CRE2	4.3 (0.1)	3.2 (0.1)	1132 (91)	108 (6)	1240 (97)
65	MC	4.1 (0.1)	3.2 (0.2)	1300 (33)	113 (7)	1413 (40)
			Fósforo			
11	V2	0.5 (0.01)	0.9 (0.01)	0.03 (0.001)	0.01 (0.001)	0.04 (0.002)
17	V4	0.6 (0.01)	0.8 (0.01)	0.21 (0.03)	0.03 (0.001)	0.24 (0.03)
24	V6	0.6 (0.01)	0.8 (0.02)	1.1 (0.3)	0.1 (0.03)	1.2 (0.33)
29	V8	0.6 (0.02)	0.8 (0.01)	3.4 (0.3)	2 (0.03)	5.4 (0.33)
35	IFRO	0.6 (0.02)	0.8 (0.02)	14 (2)	6 (1)	20 (3)
43	IFRE	0.6 (0.01)	0.8 (0.02)	45 (4)	11 (1)	56 (5)
50	CRE1	0.5 (0.01)	0.7 (0.01)	95 (6)	15 (2)	110 (8)
57	CRE2	0.5 (0.02)	0.7 (0.02)	128 (7)	22 (2)	150 (8)
65	MC	0.5 (0.01)	0.6 (0..02)	142 (13)	21 (2)	163 (15)
			Potasio			
11	V2	4.1 (0.1)	4.3 (0.1)	0.3 (0.1)	0.1 (0.03)	0.3 (0.13)
17	V4	6.3 (0.1)	6.9 (0.2)	2.1 (0.3)	0.3 (0.02)	2.4 (0.32)
24	V6	7.1 (0.2)	7.4 (0.2)	12 (1)	1 (0.03)	13 (1.03)
29	V8	7.0 (0.1)	6.9 (0.1)	39 (4)	16 (2)	55 (6)
35	IFRO	6.0 (0.1)	6.3 (0.2)	141 (9)	43 (4)	184 (13)
43	IFRE	5.5 (0.1)	6.3 (0.1)	438 (13)	93 (6)	531 (19)
50	CRE1	4.5 (0.2)	5.9 (0.2)	805 (25)	127 (9)	932 (34)
57	CRE2	4.4 (0.2)	5.7 (0.2)	1156 (78)	192 (16)	1348 (96)
65	MC	4.3 (0.2)	5.2 (0.2)	1360 (100)	187 (15)	1547 (115)

* *Escala fenológica según Huerres y Caraballo (1988). PA = Porción aérea; PR = Porción radical; V2, V4, V6 y V8 = Dos, cuatro, seis y ocho hojas, respectivamente; IFRO = Inicio de formación de la roseta; IFRE = Inicio de formación del repollo. CRE1 y CRE2: 30 y 60% del crecimiento del repollo; MC = Madurez comercial; DDE = Días después de la emergencia. Los valores entre paréntesis corresponden a las desviaciones estándar (n = 3).*

Broadley, M. R., I. Seginer, A. Burns, A. J. Escobar-Gutiérrez, I. G. Burns y P. J. White. 2003. The nitrogen and nitrate economy of butterhead lettuce (*Lactuca sativa* var. Capitata L.). J. Experimental of Botany. 54:2081-2090.

Bugarin-Montoya R, M. Virgen-Ponce, A. Galvis-Spindola, D. Garcia-Paredes, T. Hernández-Mendoza, I. Bojórquez-Serrano, y A. Madueño-Molina. 2011. Extracción de nitrógeno en seis especies olericolas durante su ciclo de crecimiento. Bioagro. 23(2):93-98.

Burgueño, H. 1994. La fertigación en cultivos hortícolas con acolchado plástico. Culiacán, México: Folleto técnico.

Castellanos, Z.J., J.L. Ojodeagua, F. Méndez, G. Alcantar, S. Villalobos-Reyes, P. Vargas, J.J. Muñoz-Ramos e I. Lazcano-Ferrat. 2002. Potassium requirements for garlic under fertigation. Better Crops International. 16(1):9-11.

Castellanos, J.Z. 1997. Las curvas de acumulación nutrimental en los cultivos hortícolas y su importancia en los programas de fertilización. In: Memorias del 2do. Simposio Internacional de Fertigación. FIRCO. Querétaro, México. 73-82.

Castellanos, J.Z., A. Sosa, V. Badillo, S. Villalobos, y I. Lascano. 1999. Nutritional management in broccoli in central Mexico. In: T. A. Tindall and D. Westerman (Editors). Proceedings of the Third Western Nutrient Management Conference. Salt Lake City, Utah, USA. 44-48.

Costigan, P. A. 1987. A model to describe the pattern of availability of broadcast phosphorus fertilizer during the growth of a crop. Plant and Soil. 101:281-285.

Doerge A.T., K.H. Pritchard, y W.T. McKreary. 1992. Nitrogen Management in Drip Irrigated Leaf Lettuce, Spinach and Green Crops. Vegetable Report. 31-62.

Duque, M.M.C., C.E.G. Perdomo, y J.V. Jaramillo. 1983. Crecimiento y absorción de nitrógeno, fósforo y potasio en cebolla *Allium cepa* L. variedad Ocañera. Acta Agronómica. 33:16-22.

Etchevers, B.J.D., J. Rodríguez, y A.S. Galvis. 1991. Generación de recomendaciones de fertilización mediante un enfoque sistémico racional. Terra. 9:3-10.

Evers, A.M. 1988. Effects of different fertilization practices on the growth, yield, and dry matter content of carrot. Journal of Agricultural Science Finland. 60:153-152.

Fassbender, H.W., y E. Bornemisza. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.

Fontes, P.C. R., P.R.G. Pereira, y R.M. Conde. 1997. Critical chlorophyll, total nitrogen, and nitrate-nitrogen in leaves associated to maximum lettuce yield. Journal of Plant Nutrition. 20:1061-1068.

Gardner, B.R., y W.D. Pew. 1979. Comparisons of various N sources for fertilization of winter grown head lettuce. Journal of the American Society for Horticultural Science. 104:534-536.

Gardner, P.F., B.R. Pearce, y R.L. Mitchell. 1985. Physiology of crop plants. University Press. Ames Iowa, USA.

Heinen, M., A. de Jager, y H. Niers. 1991. Uptake of nutrients by lettuce on NFT with controlled composition of the nutrient solution. Journal of Agricultural Science. 9:97–212.

Honorato, R., L. Gurovich, y R. Piña. 1993. Ritmo de absorción de N, P y K en pepino de semilla. Ciencia e Investigación Agraria. 3:69-172.

Huerres, P.C., y N.L. Caraballo. 1988. Horticultura. Editorial Pueblo y Educación. La Habana, Cuba.

Huett, D.O., y B.E. Dettmann. 1991. Nitrogen response surface models of zucchini squash, head lettuce, and potato. Plant and Soil. 134:243-254.

Jackson, M.L. 1976. Análisis químicos de suelos. Editorial Omega. Barcelona, España.

Kamata, Y. 1969. Cultivation by using large machinery in volcanic ash soil, part 2. Agric. Technology. 24:506-508.

Lawton, K., y J.A. Vomocil. 1954. The dissolution and migration of phosphorus from granular superphosphate in some Michigan soils. Soil Science Society of America Proceedings. 18:26-32.

Libert, B., y R.V. Franceschi. 1987. Oxalate in crop plants. J. Agric. Food Chem. 35:926-938.

Maroto, J.V. 1990. Elementos de la horticultura general. Mundi-Prensa. Madrid, España.

May, G.M., M.P. Pritts, y M.J. Kelly. 1994. Seasonal patterns of growth and tissue nutrient content in strawberries. Journal of Plant Nutrition. 17:1149-1162.

Murakami, T., K. Yamada, y S. Yoshida. 2002. Root distribution of field-grown Crisphead lettuce (*Lactuca sativa* L.) under different fertilizer and mulch treatment. Soil Science and Plant Nutrition. 48:347–355.

Nagata, R.T., C.A. Sanchez, y F.J. Coale. 1992. Crisphead lettuce cultivar response to fertilizer phosphorus. Journal of the American Society for Horticultural Science. 117:721-724.

NFDC (National Fertilizer Development Center Tennessee Valley Authority). 1976. Greenhouse techniques for soil–plant fertilizer research. Muscle Shoals, Alabama, USA.

Pritchard, K.H., T.A. Doerge, y T.L. Thompson. 1995. Evaluation of in-season nitrogen tissue tests for drip-irrigated leaf and romaine lettuce. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 26:237-257.

Rincón, S.L., C.B. Pellicer, y J. Sáez. 2002. Crecimiento vegetativo y absorción de nutrientes del apio en fertirrigación. Invest. Agr. Prod. Prot. Veg. 17(2):291-302.

Rincón, S.L. 2004. Pautas para una correcta fertigación de la lechuga Iceberg. Vida rural. Marzo: 38-42.

Rodas-Gaitan, A.H., H. Rodríguez-Fuentes, M.dC. Ojeda-Zacarias, J.A. Vidales-Contreras, y A.I. Luna-Maldonado. 2012. Curva de absorción de macronutrientes en calabacita italiana (*Cucurbita pepo* L.). Revista Fitotecnia Mexicana. (número especial 5). 75-60.

Seginer, I. 2003. A dynamic model for nitrogen-stressed lettuce. Annals of Botany. 91:623-635.

Sosa, B.A. 2007. Acumulación de materia seca y absorción de N, P y K en tres hortalizas cultivadas en invernadero. Tesis de Maestria. IRENAT-COLPOS. Montecillos, Estado de México, México.

Sosa, A., G. Ruíz, I. Bazante, A. Mendoza, J.D. Etchevers, J. Padilla, y J. Castellanos. 2013. Absorción de nitrógeno, fósforo y potasio en zanahoria cultivada en el Bajío de México. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica. 11:27-30.

Sosa, A., J. Muro, G. Gordillo, H. West, X. Liu, G. Ruíz, J. Etchevers, y J. Padilla. 2015. Demanda de macro y micronutrientes por espinaca (*Spinacia oleracea* L.) cultivada en El Llano en Llamas de Jalisco, México. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica. 19:5-10.

Tapia, M.L., y V. Gutiérrez. 1997. Distribution pattern of dry weight, nitrogen, phosphorus, and potassium through tomato ontogenesis. Journal of Plant Nutrition. 20:783-791.

Tyler, K.B., y O.A. Lorenz. 1964. Nutrient absorption and growth of four muskmelon varieties. Proceedings of the American Society for Horticultural Science. 48:364-371.

Valle, M.J.C. 2010. Acumulación de biomasa, crecimiento y extracción nutrimental en pimiento morrón (*Capsicum annum* L.). Tesis de maestría. Departamento de Fitotecnia. UACH. Chapingo, Estado de México, México.

Villalobos, V.E., y R.C.E. Salas. 2012. Curvas de absorción de nutrientes bajo dos métodos de fertilización en sandia, en Guanacaste, Costa Rica. InterSedes Revista de las Sedes Regionales. 13(26):19-44.

Ward, G.M. 1967. Growth and nutrient absorption in greenhouse tomato and cucumber. Proceedings of the American Society for Horticultural Science. 90:335-341.

Welch, N.C., K.B. Tyler, D. Ririe, y F. Broadbent. 1983. Lettuce efficiency in using fertilizer nitrogen. California Agriculture. 37:18-19.

Zink, F.W. 1966. Studies on the growth rate and nutrient absorption of onions. Hilgardia. 37:203-218.

Zink, F.W. 1963. Rate of growth and nutrient absorption of late garlic. Proceedings of the American Society for Horticultural Science. 83:579-584.

Zink, F.W., y M. Yamaguchi. 1962. Studies on the growth rate and nutrient absorption of head lettuce. Hilgardia. 32:471-500.

Cursos y Simposios

1. V Congreso Nacional de Ciencias Agrarias

Organiza : Facultad de Ciencias Agrarias (UNA)
Lugar : Asunción, Paraguay
Fecha : Abril 19-21, 2017
Información : https://cnca2017.com

2. Simposio Fertilidad 2017 "Mas allá de la próxima cosecha"

Organiza : IPNI Cono Sur, Fertilizar AC
Lugar : Rosario, Santa Fe, Argentina
Fecha : Mayo 17-18, 2017
Información : http://lacs.ipni.net
www.fertilizar.org.ar

3. VII Congreso Mundial de Agricultura de Conservación y XXV Congreso AAPRESID

Organiza : Aapresid
Lugar : Rosario, Santa Fe, Argentina
Fecha : Agosto 1-4, 2017
Información : http://congresoaapresid.org.ar

4. X Conferencia Mundial de Soja

Organiza : Universidad de Georgia
Lugar : Savannah, Georgia, EE.UU.
Fecha : Septiembre 10-15, 2017
Información : http://wsrc10.net

5. V Reunión de la Red Argentina de Salinidad. "Salinidad: Un desafío para el semiárido"

Organiza : AACS
Lugar : Villa Mercedes, San Luis, Argentina
Fecha : Octubre 4-6, 2017
Información : info.ras2017@gmail.com
http://www.suelos.org.ar

6. ASA-CSSA-SSSA Meetings: "Managing Global Resources for a Secure Future"

Organiza : ASA-CSSA-SSSA
Lugar : Tampa, Florida, EE.UU.
Fecha : Octubre 22-25, 2017
Información : https://www.acsmeetings.org

Publicaciones Disponibles

Titulo de la Publicación	Costo (US$)	Costo ($ arg.)
NUEVO. Los desafíos de la agricultura. En esta publicación, el Dr. Fernando H. Andrade (INTA-CONICET-FCA/UNMdP) amplia su anterior obra "La tecnología y la producción agrícola, el pasado y los actuales desafíos". En esta obra, el autor nos brinda su profunda y relevante visión para pensar como construir una mejor agricultura para una mejor sociedad.	**9.00**	**120.00**
Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. 2da Edición (2015). INTA e IPNI han editado esta nueva edición, que incluye la participación de más de 30 reconocidos autores de los 34 capítulos y el anexo. El Ing. Agr. M.Sc. Hernán E. Echeverría y el Dr. Fernando O. García son los compiladores de esta obra de referencia en el tema.	**40.00**	**550.00**
Simposio Fertilidad 2015. CD de las Actas con los trabajos extendidos de presentaciones orales y posters presentados en el Simposio organizado por IPNI y Fertilizar AC, Rosario. 19 y 20 de Mayo de 2015.	**7.00**	**100.00**
Manual 4R de la Nutrición de Plantas. Bajo el lema de los 4 Requisitos (R) básicos de la nutrición: la fuente correcta, en la dosis, el momento, y la localización correctos, este Manual busca servir de apoyo para la toma de decisiones referidas al manejo de la nutrición de los cultivos.	**40.00**	**600.00**

Vea el catálogo completo de publicaciones del IPNI Cono Sur en http://Lacs.ipni.net

Para conocer los gastos de envío y cualquier otra consulta de publicaciones por favor enviar un correo electrónico a Lpisauri@ipni.net

Simposio Fertilidad 2017

Más allá de la próxima cosecha

17 Y 18 DE MAYO

CENTRO DE CONVENCIONES
METROPOLITANO
ROSARIO, SANTA FE, ARGENTINA

IPNI
INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE

web LACS.IPNI.NET
@IPNIcs

FERTILIZAR
ASOCIACION CIVIL

FERTILIZAR.ORG.AR web
@FertilizarAC