

Gestión de suelo y agua en sistemas productivos de la provincia de San Luis

Claudio Alejandro Saenz y Juan Cruz Colazo



Gestión de suelo y agua en sistemas productivos de la provincia de San Luis

Claudio Alejandro Saenz y Juan Cruz Colazo



Gestión de suelo y agua en sistemas productivos de la provincia de San Luis

Claudio Alejandro Saenz y Juan Cruz Colazo

Saenz, Claudio Alejandro
Gestión de suelos y agua en sistemas productivos de la provincia de San Luis / Claudio Alejandro Saenz y Juan Cruz Colazo. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Ediciones INTA, 2015.
E-Book.

ISBN 978-987-521-633-4

1. Suelo. 3. Agua. I. Cruz Colazo, Juan II. Título
CDD 631.4



Dirección Nacional Asistente de Sistemas de Información, Comunicación y Calidad
Gerencia de Comunicación e Imagen Institucional
Comunicación Visual

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su almacenamiento en un sistema informático, ni su transmisión en cualquier formato o por cualquier medio, electrónico, mecánico, fotocopia u otros métodos, sin el permiso previo del editor.

Prefacio

El suelo cumple diversas funciones: proveer de sustento para la productividad animal y vegetal; la edificación; el ciclado de nutrientes y el agua; y el filtrado de contaminantes. Actualmente, los sistemas productivos del E de San Luis han experimentado un cambio debido al incremento en la proporción que ocupa la agricultura. Para hacer un uso sostenible del suelo, este avance debe ser acompañado por prácticas de manejo que permitan realizar un uso más eficiente del recurso sin degradarlo. Para ello, los usuarios del recurso deben conocer cuáles son los procesos y mecanismos básicos que regulan el manejo del suelo.

En primer lugar, se presenta una descripción de las características y uso de las cartas de suelo e interpretaciones derivadas de las mismas, herramientas que pueden ser consultadas para cualquier sitio de la provincia, brindándonos una primera aproximación sobre las características, distribución y potencial uso del suelo. Una vez conocidos los principales rasgos de nuestros suelos de interés, podremos dilucidar cuales son las principales limitantes para el crecimiento de los cultivos.

La fertilidad del suelo es una disciplina científica que integra los principios básicos de la de biología, química y física de suelo para desarrollar las prácticas de manejo necesarias para el manejo de nutrientes en forma rentable y ambientalmente segura. No todas las limitantes poseen la misma jerarquía de importancia, es por ello que las mismas son analizadas siguiendo un enfoque secuencial, en donde se abordan en un primer momento aspectos relacionados con alteraciones en la fertilidad, relacionadas con salinidad y sodicidad; y con la fertilidad física, más precisamente con el manejo del agua y limitaciones para el crecimiento de las raíces. Una vez desarrollados estos conceptos se abordan temas relativos a la nutrición mineral, siendo el nitrógeno y fósforo, los dos macro nutrientes más limitantes, seguido del azufre y los micronutrientes, elementos que en determinadas circunstancias presentan respuesta a la fertilización cuando los primeros no son limitantes. Por último, se presentan aspectos más prácticos relacionados con el muestreo de suelos e interpretación de análisis.

Incrementar la eficiencia en el uso del agua para la producción agrícola es uno de los aspectos más importantes ante el reto de producir alimentos en una sociedad creciente con recursos hídricos cada vez más limitantes.

Gestionar adecuadamente el agua en sistemas de secano implica manejar la captación, el almacenaje, la conservación del agua pluvial en el suelo y la eficiencia en el uso de la misma mediante cultivos forrajeros o agrícolas. Los sistemas de secano dependen casi exclusivamente de las precipitaciones las cuales en regiones semiáridas suelen ser muy variables, con valores medios que no alcanzan para cubrir las demandas de cultivos de alto rendimiento. Es por ello, que conocer la probabilidad de las precipitaciones y el agua almacenada en el suelo permite reducir la incertidumbre y manejar el riesgo de éxito asociado al principal factor que determina la productividad de los cultivos. A su vez, la presencia de napa y/o ascenso capilar desde la zona saturada representa una oportunidad para cubrir los requerimientos de uso consuntivo de los cultivos, pero también puede representar un riesgo de salinización de los suelos.

La cobertura con residuos del suelo es uno de los principales factores que regula la dinámica hídrica en la interfase suelo-atmósfera. La inclusión de cultivos de cobertura puede mejorar la eficiencia en el uso del agua en aquellas situaciones donde, por bajos rendimientos o residuos de rápida descomposición, la eficiencia de almacenamiento y conservación del agua pluvial es baja. También puede mejorar esta eficiencia mediante el control de malezas difíciles o resistentes.

Gestionar adecuadamente el agua en sistemas de riego implica ser más eficiente en la aplicación de las láminas de riego. La utilización de nuevos sistemas de riego y la aplicación de modelos de simulación permiten combinar el agua pluvial junto al agua de riego, dependiendo las necesidades de los cultivos, como claves para mejorar la eficiencia y reducir el costo del milímetro aplicado.

La necesidad de mejorar la eficiencia en el uso del agua requiere evaluar diversos sistemas de riego con la finalidad de poder proveer recomendaciones sobre distintas prácticas de riego al productor. Realizar el balance hídrico en cultivos bajo riego permite presupuestar la lámina de riego a aplicar de acuerdo a las condiciones climáticas y estadio del cultivo. Por último, la simulación mediante el uso de modelos matemáticos permite integrar las características del agua, del suelo y del clima disponibles, así como de los cultivos, pudiendo determinar los momentos y cantidades de agua a aplicar.

El objetivo de esta obra fue elaborar una guía práctica para la gestión del suelo y el agua en producciones de secano y riego de la región, enfatizando el análisis de procesos básicos y datos obtenidos a través de experiencias locales.

Introducción

El texto que aquí presentamos Gestión de suelo y agua en sistemas productivos de la provincia de San Luis, es un trabajo interdisciplinario que integra información actualizada sobre la relación dinámica entre el suelo, el agua, los cultivos y, las buenas prácticas necesarias.

Los editores manifiestan “los sistemas productivos del este de San Luis han experimentado un cambio debido al incremento en la proporción que ocupa la agricultura. Para hacer un uso sustentable del suelo y el agua, este avance debe ser acompañado por prácticas de manejo que permitan realizar un uso más eficiente del recurso sin degradarlo. Para ello, los usuarios deben conocer cuáles son los procesos y mecanismos básicos que regulan el manejo del suelo”.

El índice señala un recorrido de información integrado donde se complementa la teoría con las prácticas necesarias para una agricultura amigable con el ambiente. Somos conscientes que la “presión” de manejo extractiva-mineralizadora sobre los suelos del este de San Luis continúa por diversas razones y, con ello la lógica preocupación y ocupación para mitigar dichas prácticas.

Por ello el texto es un aporte destinado a todos aquellos tomadores de decisión sean los dueños de campo, los arrendatarios, profesionales asesores, educadores y los responsables de las políticas públicas.

Felicitamos a los autores y editores por el esfuerzo intelectual realizado, como así también, por lo oportuno de la temática abordada.

Ing. Agr. (Dr.) Ricardo D. Thornton
Director Regional La Pampa-San Luis

Editores

Claudio Alejandro Saenz

Ingeniero Agrónomo, Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de San Luis; Magister en Riego y Drenaje, Universidad Nacional de Cuyo. Investigador de la EEA INTA San Luis. Actualmente es coordinador del módulo de programación de riego del programa nacional de agua. También participa en proyectos territoriales y nacionales, relacionados con la problemática de la gestión del agua.

Juan Cruz Colazo

Ingeniero Agrónomo, Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de La Pampa; Doctor en Agronomía, Departamento de Agronomía de la Universidad Nacional del Sur. Investigador en manejo de suelos de la EEA INTA San Luis. Actualmente es coordinador interino del área de investigación de la EEA INTA San Luis y del módulo erosión eólica del programa nacional de suelos. También participa en proyectos territoriales y nacionales, relacionados con la problemática de los sistemas de producción mixtos, la gestión del agua en el suelo y los procesos de degradación relacionados con el uso inadecuado de los suelos.

Índice

Prefacio	I
Introducción	III
Editores	IV
Evaluación de suelos y tierras para diferentes fines	1
Juan Cruz Colazo	
Salinidad y fertilidad física de los suelos de San Luis	9
Juan Cruz Colazo, Juan de Dios Herrero y Claudio Saenz	
Nitrógeno	24
Juan Cruz Colazo	
Fósforo	35
Juan Cruz Colazo	
Azufre	44
Juan Cruz Colazo	
Micronutrientes	49
Juan Cruz Colazo	
Muestreo de suelos	55
Juan Cruz Colazo y Juan de Dios Herrero	
Interpretación de análisis de suelos.	
Manejo de unidades de nitratos y fósforo disponible	68
Juan Cruz Colazo y Juan de Dios Herrero	
Ciclo del agua en San Luis	72
Claudio Alejandro Saenz y Juan Cruz Colazo	
Calidad del agua	92
Claudio Alejandro Saenz	
Relación entre el agua de riego y los cultivos	101
Claudio Alejandro Saenz y Matias Alejandro Vergés Manzur	
Métodos de riego	113
Claudio Alejandro Saenz	
El riego deficitario controlado como una estrategia para incrementar la eficiencia en el uso del agua y la rentabilidad de los cultivos extensivos	121
Alfonso Domínguez Padilla, Angel Martínez-Romero, Marisa Garbero y Claudio Saenz	

Evaluación de suelos y tierras para diferentes fines

Juan Cruz Colazo
EEA INTA San Luis

1. Cartas de suelo

La correcta planificación de las actividades agropecuarias requiere la evaluación de las propiedades de los suelos y de las respuestas de estos ante diferentes alternativas de manejo. El principal objetivo del levantamiento de suelos es la elaboración de predicciones más precisas, numerosas y útiles sobre usos específicos de las tierras. Para lograr este objetivo, se determina el patrón de distribución de suelos, dividiendo la superficie en unidades relativamente homogéneas, cartografiando dichas unidades y caracterizando sus propiedades, clasificándolos según un sistema estándar y elaborando predicciones sobre su comportamiento (Niborski, 2002).

La clasificación de los levantamientos de suelos surge de la relación de dos aspectos básicos de la cartografía: el objetivo del mapa y la escala. Ambos aspectos se relacionan, además, con el tipo de unidad cartográfica y con la taxonómica (Degioanni, 2006; Tabla 1).

Tabla 1. Tipo de levantamiento, escalas generalmente utilizadas, unidades taxonómicas (UT) y cartográficas (UC), objetivos y destinatarios del mismo. SO=Suborden, GG=Gran-Grupo, SG=Subgrupo, F=Familia, S=Serie, GA=Gran asociación, A=Asociación, C=Consociación, Cj=Complejo, Fs=Fase.

Tipo	Escala	UT	UC	Objetivos	Destinatario
Esquemático	< 1:500000	SO, GG, SG	GA	Educación, reconocimiento	Educandos
Reconocimiento	1: 500000 - 100000	SG, F	A	Planificación nacional, regional	Decisores
Semidetalle	1: 100000 – 30000	F, S	A, C, Cj, Fs	Planificación, cuenca, predial extensiva	Asesores, extensionistas
Detalle	1:25000 - 10000	S	C, Cj, Fs	Manejo por ambiente	Asesores, productores
Intensivo	> 1:10000	S	Fs	Agricultura de precisión	Asesores, productores

Una unidad taxonómica es una unidad de clasificación de un sistema taxonómico. En el sistema Soil Taxonomy, el más utilizado en Argentina, la serie es la categoría más homogénea de todas. Una serie es un grupo homogéneo de suelos, desarrollados sobre el mismo material parental y que presentan relativamente la misma frecuencia de horizontes y características suficientemente similares. En general, se las denomina por el nombre del lugar donde fueron reconocidas (ej. serie BUENA ESPERANZA). Las unidades cartográficas

ficas corresponden a los polígonos dibujados en el mapa que representan la ubicación, los límites y la superficie de las unidades de suelo. Cuando las poblaciones de suelos son homogéneas (misma taxa) se denomina consociación, si por el contrario representan poblaciones heterogéneas con un patrón geográfico regular, lo que permite que estos suelos puedan ser separados en levantamientos más detallados, se denominan asociaciones. Si el patrón de distribución espacial es muy intrincado, se denomina complejo (Degioanni, 2006).

El territorio de la provincia de San Luis es el único junto con el de la provincia de Entre Ríos con la totalidad de su superficie con una cartografía de suelos semidetallada. Para ello, primeramente fue elaborado un mapa esquemático de suelos de la provincia (Peña Zubiato y Strasser, 1981), luego un mapa integrado de unidades de vegetación y suelos en escala de reconocimiento (Peña Zubiato et al., 1998), y por último, siete hojas en escala 1 : 100000 (INTA y Gobierno de San Luis, 1991, 1992, 1992b, 2000, 2005, 2007) y una en escala 1 : 200000 (INTA y Gobierno de San Luis, 2009; Figura 1).

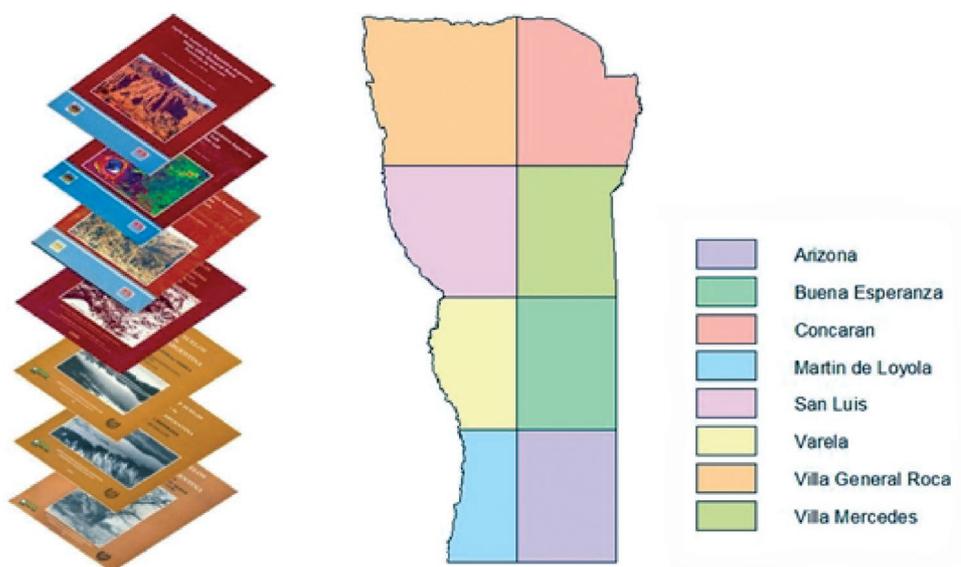


Figura 1. Cartas de suelo de la provincia de San Luis en escala semidetallada.

Cada hoja comprende por un lado, el texto, en donde se resumen: a) factores formadores de suelo (clima, material parental, relieve, vegetación), b) descripción técnica y analítica del perfil modal de cada unidad taxonómica, clasificada a nivel de serie según el sistema Soil Taxonomy, c) descripción de las unidades cartográficas, su uso actual, capacidad de uso, índice de productividad y grado de erosión. Por otro lado, se presentan los mapas, los cuales muestran la distribución espacial de unidades cartográficas. La información suministrada por las cartas permite fortalecer el ordenamiento territorial que sirve como herramienta en políticas impositivas, crediticias y de planificación a nivel regional, de cuenca y predial extensiva, permitiendo un uso racional del suelo. También suelen utilizarse para la evaluación en la compra o arrendamiento de predios o lotes, en la selección de sitios de investigación y como datos de entrada en modelos agronómicos. Para ello, la utilización

de propiedades relativamente estáticas en el tiempo, como la secuencia de horizontes y la textura suelen resultar útiles. Por último, estas son fundamentales como base para la elaboración de cartografía más detallada, actualmente demandada para el manejo por ambiente y la agricultura de precisión.

2. Clasificaciones orientadas a la producción agropecuaria

2.1. Capacidad de uso

Esta metodología de evaluación fue desarrollada para los sistemas productivos de Estados Unidos hace más de cincuenta años (Klingebiel y Montgomery, 1961). Es un ordenamiento de tierras, ya que además de las limitaciones edáficas tiene en cuenta limitaciones climáticas. Se distinguen tres niveles de clasificación:

a) Clases de capacidad de uso: ubica a todos los suelos en ocho clases de capacidad de uso. Los riesgos de que ocurran daños al suelo, o las limitaciones para su uso, aumentan progresivamente de la clase I a la clase VIII, siendo los suelos de clase I a IV aquellas tierras con vocación agrícola, los suelos de la clase V a VII las tierras con vocación pastoril y los suelos de clase VIII las tierras sin utilidad agropecuaria.

b) Subclases de capacidad de uso: en la misma se agrupan las unidades de capacidad de uso, con similares clases de limitaciones y riesgos. Se reconocen cuatro clases de limitaciones o riesgos: erosión (e), excesos de agua (w), limitaciones edáficas como salinidad o escasa retención de agua, entre otros (s) y climáticas (c).

c) Unidad de capacidad de uso: agrupa los suelos que responden de manera similar a la aplicación de determinados sistemas de manejo, solamente se llega a este nivel con fines de clasificación individual de predios.

Aplicadas al territorio provincial se encuentran tierras clasificadas como IV, VI, VII y VIII (Figura 2). Las tierras de la clase IV son suelos agrícolas con limitaciones severas que requieren prácticas de manejo y conservación complejas, y son adecuados para una estrecha gama de cultivos. Ocupan los sectores interserranos, las planicies de Villa Mercedes–Justo Daract y el sector de Arizona. Las tierras de la clase VI y VII son suelos con graves y muy graves limitaciones, respectivamente, de aprovechamiento pastoril, ubicados al O de la provincia y ocupan más del 90% de la superficie provincial. Por último, las tierras de la clase VIII son suelos que quedan restringidos para usos como la recreación y el refugio de la fauna. La limitación al uso de los suelos que más predomina en todas las clases es la susceptibilidad a la erosión (Peña Zubiarte et al., 2003).

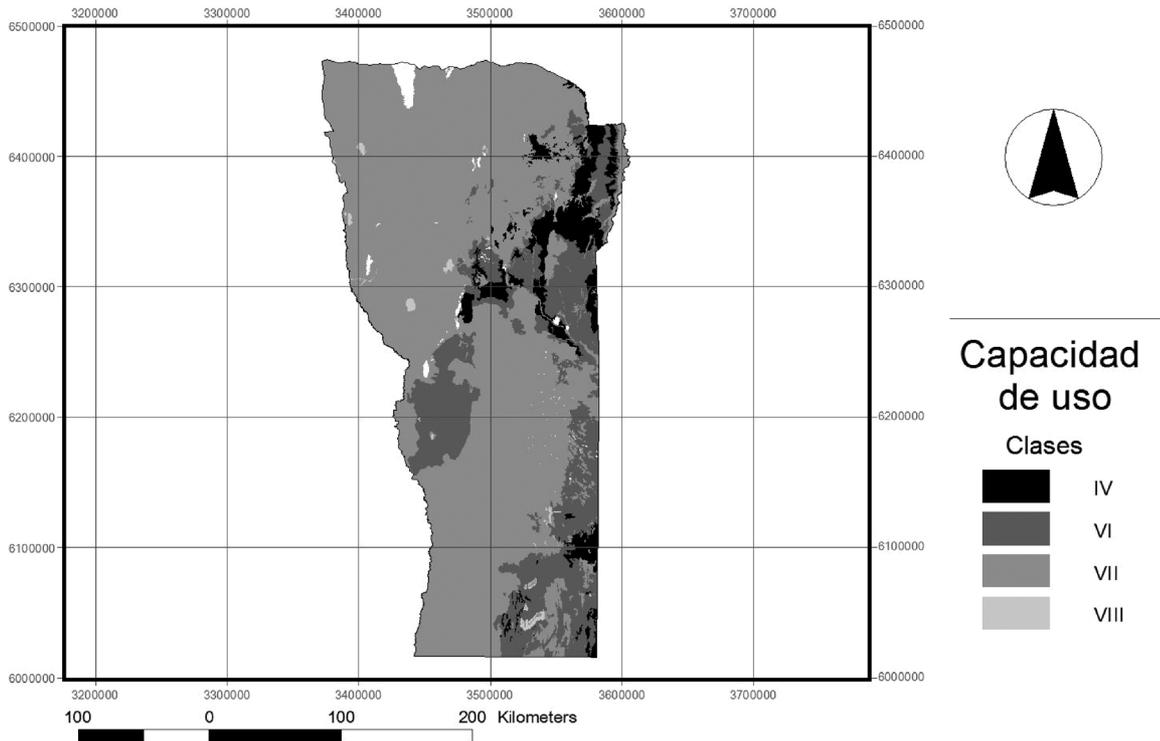


Figura 2. Clases de capacidad de uso de los suelos de San Luis. Adaptado de BRS (2000).

Se debe considerar que esta metodología se encuentra desactualizada para los sistemas de producción de la provincia, debido a que con la incorporación de la siembra directa se redefinen las limitantes edáficas relacionadas con la arabilidad de las tierras y la disponibilidad de agua, y además las condiciones climáticas han variado debido a la tendencia creciente de las precipitaciones registradas en varias localidades de la provincia.

2.2. Índice de productividad

El índice productivo o índice de productividad (IP) es un índice paramétrico de evaluación de tierras propuesto por Riquier et al. (1970) y modificado por Nakama y Sobral (1987) para las condiciones de relevamiento en el país. Se trata de un método cuantitativo para evaluar la productividad, basado en la filosofía de que bajo condiciones de manejo medias, la productividad del suelo depende de características intrínsecas de este, y por lo tanto permite realizar comparaciones de producción entre distintos tipos de suelos para una determinada área, región o provincia.

Para el cálculo del mismo se utilizan relaciones causa–efecto para una determinada región climática homogénea, donde cada relación presenta una fórmula específica. Los parámetros seleccionados por incidir en el crecimiento de los cultivos fueron: disponibilidad de agua, drenaje, profundidad efectiva, textura, materia orgánica, niveles de erosión actual y potencial, y salinidad (Nakama y Sobral, 1987). En un primer lugar, se calcula el IP de cada unidad taxonómica presente y luego el de la unidad cartográfica.

En la Figura 3 se muestra el IP de los suelos de San Luis. Suelos de baja a muy baja

productividad ($IP < 25$) comprenden en general a Aridisoles, Torripsammentses y complejos. En el otro extremo solo dos series de suelo, Comandante Granville y La Toma clasifican como suelos de muy buena productividad ($IP > 75$), ubicándose el resto de los suelos en la categoría regular–buena ($75 > IP > 25$). Esta escala ha sido adaptada a las condiciones de San Luis (Peña Zubiarte et al., 2003).

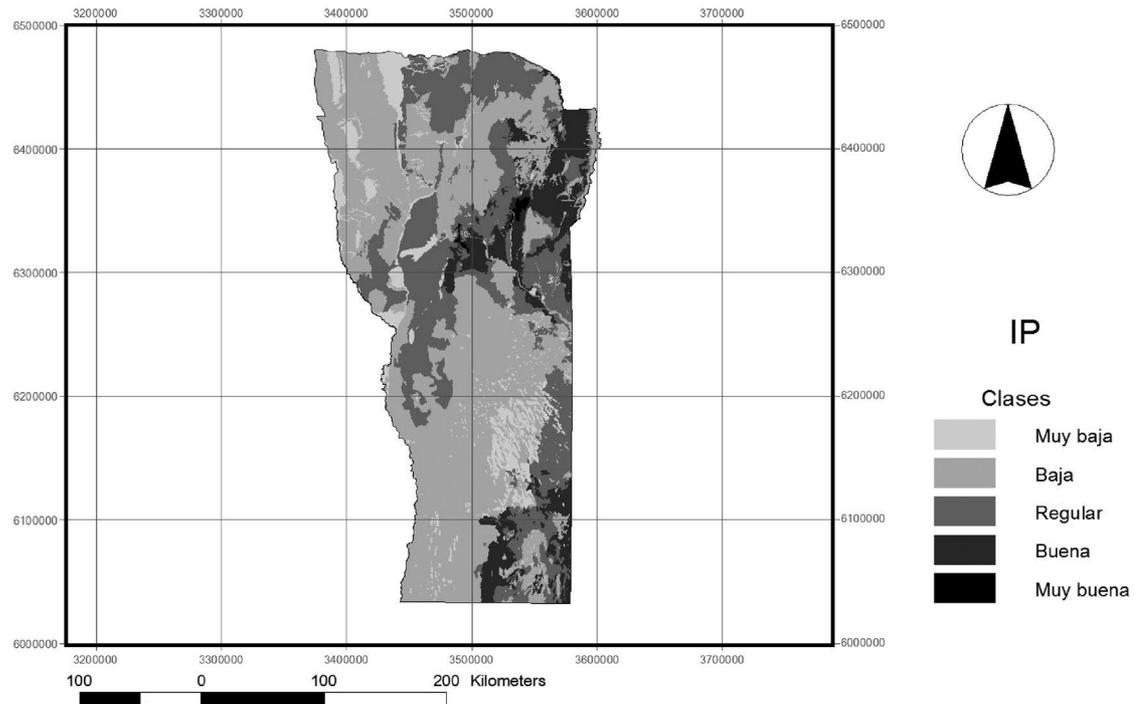


Figura 3. Índice de productividad (IP) de los suelos de San Luis. Adaptado de BRS (2000).

3. Aptitud para riego

La aptitud para riego no está generalmente limitada por un único factor, sino más bien está limitada por una cantidad de factores interrelacionados. Las zonas más adecuadas para el riego son los suelos de textura franca y franca arenosa, desarrollados sobre depósitos fluviales o loess. Estas zonas incluyen las planicies loésicas del S de San Luis, zonas interserranas y planos aluviales de las sierras de San Luis. En las zonas calificadas como aptas con limitaciones se encuentran las pampas serranas a alturas menores a 1200 m s.n.m., limitadas por suelos pocos profundos y el riesgo a la erosión hídrica; las planicies arenosas limitadas por la susceptibilidad a la erosión eólica, excesiva permeabilidad y baja capacidad de retención de agua; y por último, zonas de desarrollo de riego alrededor de Lafinur y Villa Mercedes, limitadas por la presencia de capas de agua subterráneas con alto contenido de sales. Entre las zonas calificadas como no aptas se encuentran los afloramientos rocosos, los abanicos aluviales que rodean las sierras debido al alto riesgo de erosión hídrica, y planicies arenosas del S, debido a la presencia de médanos y sectores salinizados como cuencas naturales o sectores deprimidos con capa freática superficial (BRS, 2000; Figura 4).

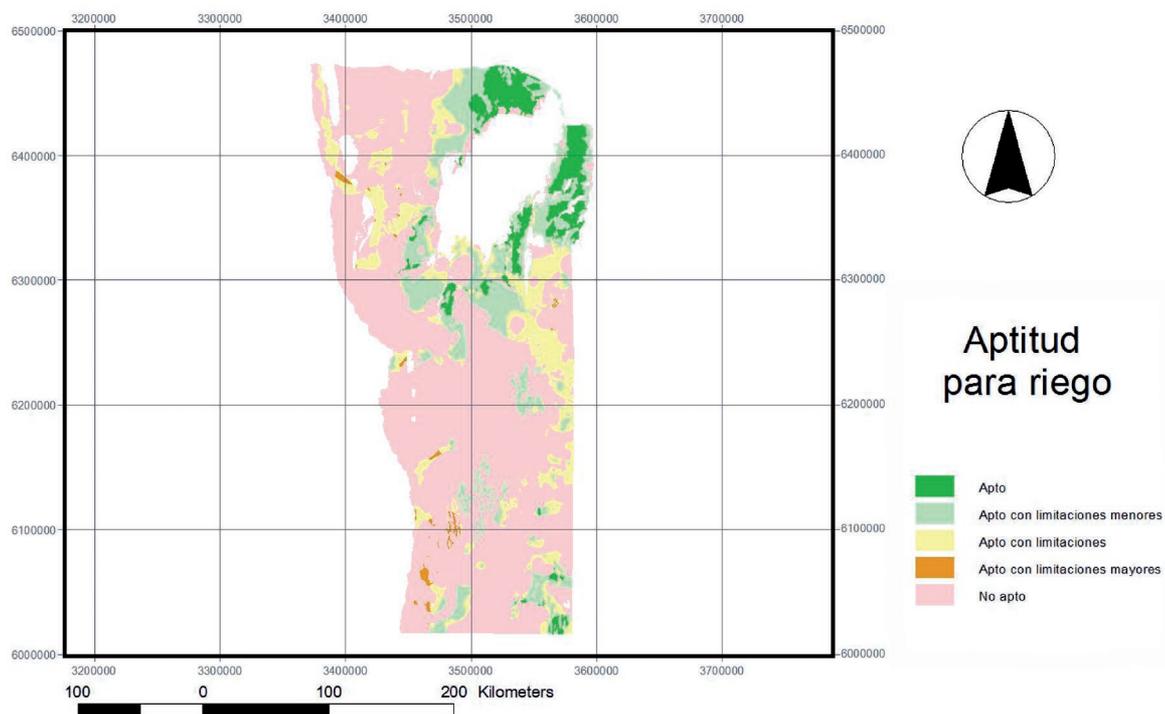


Figura 4. Aptitud para riego de los suelos de San Luis. Adaptado de BRS (2000).

4. Clasificación para cultivos específicos. Maíz y especies forestales

Peña Zubiarte y Garay (2003) agruparon las tierras de San Luis por su aptitud para el cultivo de maíz. Para ello, en función de la información de las unidades cartográficas del mapa de suelos de la provincia aplicaron la metodología propuesta por FAO (1985), cuyo sistema contempla la evaluación de tierras para uso específico. Se utilizó información de la humedad disponible, la profundidad efectiva, la salinidad, el drenaje y el riesgo de erosión. De esta forma y junto con diferentes niveles tecnológicos identificaron zonas en donde con un alto nivel tecnológico era posible alcanzar rendimientos de 7 Mg ha^{-1} de grano, consideradas tierras aptas, hasta tierras en donde los rendimientos no superaban los 3 Mg ha^{-1} o eran muy erráticos, consideradas no aptas. Las tierras aptas a moderadamente aptas constituyen el 35% de la superficie y concuerdan con aquellas tierras clasificadas según capacidad de uso como IV. Si bien esta clasificación es relativamente reciente, los datos de rendimiento deberían actualizarse debido al uso de registros pluviométricos menores a las condiciones actuales (en algunos casos, 1921–1950) y los nuevos adelantos tecnológicos.

Recientemente, Echeverría et al. (2008) elaboraron una guía de la aptitud forestal de la provincia de San Luis. Para ello, delimitaron ambientes para distintas especies, utilizando variables edáficas como la salinidad, la permeabilidad y la rocosidad.

5. Variables relacionadas con la productividad. Capacidad de retención de agua de los suelos

La disponibilidad de agua bajo un mismo régimen de precipitaciones depende entre otros factores de la capacidad de retención de agua (CRA) de los suelos. La CRA depende principalmente de dos factores genéticos de suelo: a) la textura y el espesor (Quiroga, 2012). En la provincia predominan los suelos de textura gruesa. Aproximadamente, el 32 % de los suelos tienen una textura superficial con un contenido de L+A menor al 20%, mientras que más del 65 % tienen un contenido de L+A menor al 40 %. Sin embargo, es posible encontrar suelos con contenidos de L+A mayores al 60 % y en una escasa proporción mayores al 80 % (Figura 5). Esto significa que existe aproximadamente una variabilidad en la capacidad para almacenar agua de entre 50–180 mm de agua útil por metro de espesor asociado a diferentes texturas.

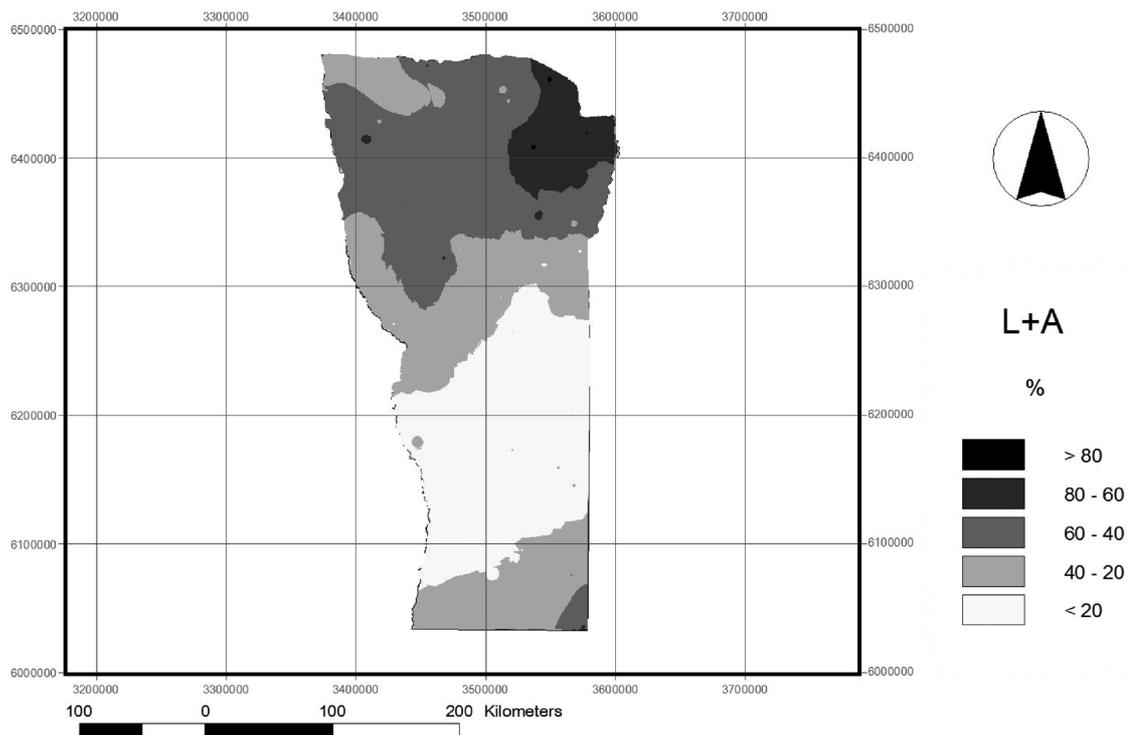


Figura 5. Contenido de limo + arcilla (L+A) del horizonte superficial de suelos en la provincia de San Luis. Elaboración propia a partir de la interpolación de perfiles de suelo (n=100).

En relación con el espesor de los suelos en la provincia, este puede estar limitado por la presencia de un manto de tosca, como por ejemplo en la serie ARIZONA al S de provincia, o por la presencia de roca en las proximidades de las sierras.

6. Consideraciones finales

- Las cartas de suelo nos brindan una primera aproximación para la evaluación de la productividad del sitio.
- La utilidad de la carta de suelos depende de su escala.

- Existen diferentes enfoques al momento de realizar evaluaciones de tierra. Algunos deben tomarse con recaudo, ya que se encuentran desactualizados para las condiciones de la provincia.

7. Bibliografía

- BRS (Bureau of Rural Sciences). 2000. Evaluación de posibilidades físicas y económicas de riego con aguas subterráneas en la provincia de San Luis. 239 pp.
- Degioanni, A. 2006. Cartografía de suelos. Pp 107–115. En: E Brichi y A Degioanni (Ed.), Sistema Suelo. Su origen y propiedades fundamentales. EFUNARC. 230 pp.
- FAO. 1985. Evaluación de tierras para la agricultura en secano. Boletín suelos 52. Roma.
- Echeverría, J.C.; E. Jobbagy y A.D. Collado. 2008. Aptitud forestal de la provincia de San Luis. INTA y Gobierno de San Luis.
- INTA y Gobierno de San Luis. 1991. Carta de Suelos de la República Argentina. Hoja Arizona. Provincia de San Luis. 102 pp.
- INTA y Gobierno de San Luis. 1992. Carta de Suelos de la República Argentina. Hoja Buena Esperanza. Provincia de San Luis. 75 pp.
- INTA y Gobierno de San Luis. 1992b. Carta de Suelos de la República Argentina. Hojas Martín de Loyola y Varela. Provincia de San Luis. 76 pp.
- INTA y Gobierno de San Luis. 2000. Carta de Suelos de la República Argentina. Hoja Villa Mercedes. Provincia de San Luis. 196 pp.
- INTA y Gobierno de San Luis. 2005. Carta de Suelos de la República Argentina. Hoja Concarán. Provincia de San Luis. 153 pp.
- INTA y Gobierno de San Luis. 2007. Carta de Suelos de la República Argentina. Hoja San Luis. Provincia de San Luis. 148 pp.
- INTA y Gobierno de San Luis. 2009. Carta de Suelos de la República Argentina. Hoja Villa General Roca. Provincia de San Luis. 137 pp.
- Klingebiel, A.A. y P.H. Montgomery. 1961. Land capability classification. Washington, DC: US Government Printing Office.
- Nakama, V. y R. Sobral. 1987. Índices de productividad. Sistemas numéricos para evaluación de tierras. Documento proyecto PNUD.
- Niborski, M.J. 2002. Nociones de cartografía, caracterización e interpretación de suelos. Cátedra de manejo y conservación de suelos. FAUBA. 61 pp.
- Peña Zubiato, C.A. y E.N. Strasser. 1981. Suelos. Pp 345–353. En: Geología y recursos naturales de la provincia de San Luis: Relatorio del VIII Congreso Argentino Geológico. San Luis.
- Peña Zubiato, C.A. y J.A. Garay. 2003. Agrupamiento de tierras de San Luis por su aptitud para el cultivo de maíz. Información Técnica 161. EEA INTA San Luis.
- Peña Zubiato, C.A.; D.L. Anderson; M.A. Demmi; J.L. Saenz y A. D’Hiriart. 1998. Carta de suelos y vegetación de la provincia de San Luis. 115 pp.
- Quiroga, A.R. 2012. Necesidad de reconocer, jerarquizar y categorizar factores que afectan la producción y sustentabilidad. Pp 5–9. En: A Corro Molas y E Ghironi (Ed.), Avances en agricultura por ambientes en la región semiárida pampeana. Publicación Técnica 90. EEA INTA Anguil.
- Riquier, J.; L. Bramao y S.P. Cornet. 1970. A new system of soil appraisal in terms of actual and potential productivity. Roma. FAO Soil Resources, Development and Conservation Service, Land and Water Development Division. 38 pp.

Salinidad y fertilidad física de los suelos de San Luis

Juan Cruz Colazo, Juan de Dios Herrero y
Claudio Saenz
EEA INTA San Luis

1. Salinidad y sodicidad

La salinidad se define como la presencia de un exceso de sales solubles. Este exceso dificulta principalmente la absorción de agua por parte de la planta, y por lo tanto aumenta el riesgo de sufrir estrés hídrico. Debido a que la concentración de sales varía a medida que cambia el contenido de agua del suelo, la salinidad del suelo se mide y expresa normalmente en base a la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo (CEe). La CEe se define como la conductividad eléctrica de la solución del agua del suelo después de añadir una cantidad de agua destilada suficiente para llevar el contenido de agua del suelo a punto de saturación. Típicamente, la CEe se expresa en deciSiemens por metro (dS m^{-1}) (Allen et al., 2006).

En nuestros ambientes, suelos salinos ($\text{CEe} > 4 \text{ dS m}^{-1}$) se encuentran asociados a lechos y aureolas de lagunas desecadas naturalmente en el sur de la provincia, en las zonas inter-serranas a suelos en terrazas y márgenes de cursos de agua con altas concentraciones de sales, y a suelos en áreas deprimidas con drenaje imperfecto y una capa freática cercana a la superficie, mientras que en el oeste de la provincia existen Aridisoles (Salortides) y Entisoles que forman cuencas salinas naturales, en las cuales las escasas precipitaciones no son suficientes para lixiviar el exceso de sales (Figura 1; Echeverría y d'Hiriart, 2006). También se han reportado procesos de salinización inducida, observables en zonas de riego ribereñas, como Villa Mercedes, Luján y Quines (BRS, 2000).

Los suelos sódicos son suelos con bajo contenido de sales, que contienen una cantidad de sodio intercambiable suficiente para afectar adversamente a la producción de los cultivos y a la estructura del suelo en la mayoría de las condiciones ambientales. Actualmente, el parámetro utilizado para definir problemas de sodicidad es la relación de absorción de sodio del extracto de saturación del suelo (RAS, Ec. 1). Los suelos sódicos deben poseer una RAS mayor a 13 (Lavado y Taboada, 2007):

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad [1]$$

Los efectos del sodio sobre las propiedades del suelo, y en última instancia sobre los cultivos, están determinados por fenómenos de hinchamiento y dispersión de arcillas. Las arcillas sódicas se hinchan y desarrollan grandes presiones dentro de los agregados, lo que debilita el enlace entre partículas produciéndose un fenómeno de dispersión, por lo que no se genera una estructura de suelo estable. El exceso de sodio afecta el funcionamiento físico-hídrico de los suelos, favoreciendo el desarrollo de costras superficiales que reducen la emergencia

de las plántulas y disminuyendo la movilidad de agua en el perfil de suelo reduciendo la infiltración y permeabilidad producto de la oclusión del sistema de poros (Taboada y Lavado, 2008)

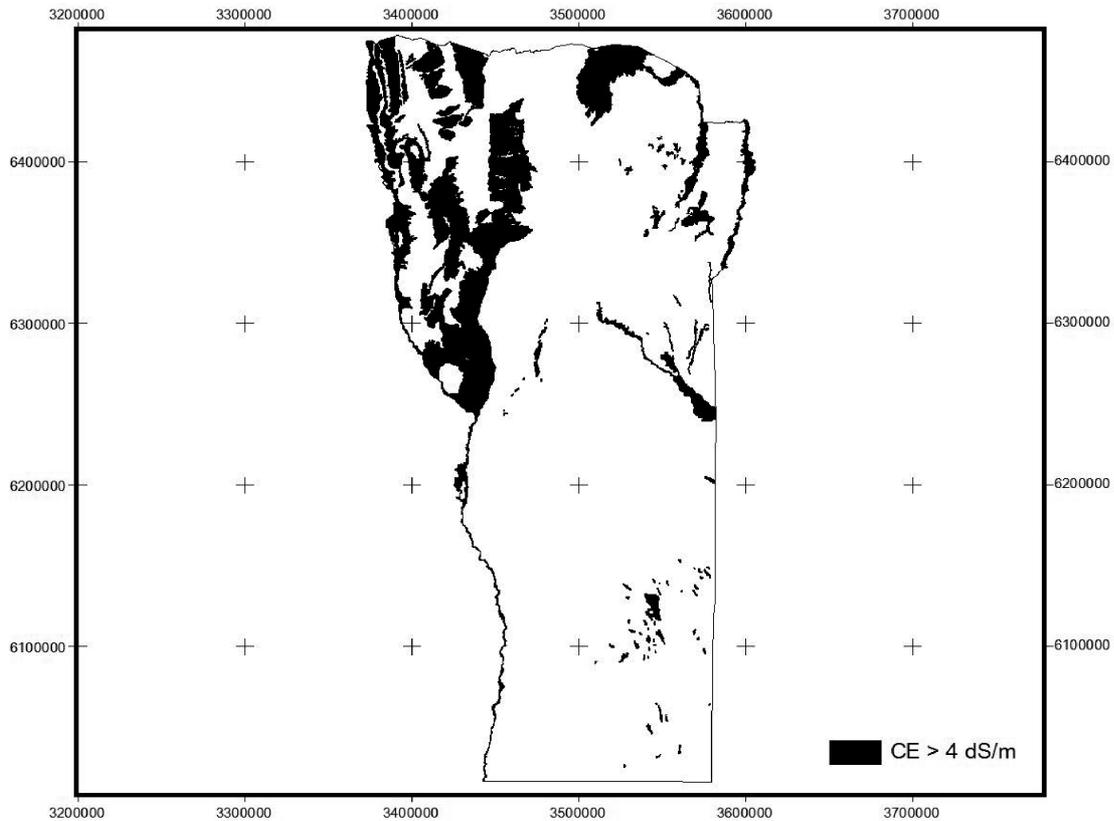


Figura 1. Unidades cartográficas donde existen valores de conductividad eléctrica en el extracto de saturación (CE). Adaptado de Echeverría y d’Hiriart (2006)

2. Fertilidad física. Aspectos relacionados con el manejo del agua y la compactación de los suelos

La fertilidad física comprende el estudio y manejo de aquellos factores y mecanismos físicos que afectan el crecimiento vegetal, ya sea por un efecto directo como el menor crecimiento radical en un suelo compactado o indirectos como una menor absorción de agua debido a una menor capacidad de almacenamiento de agua del suelo por una restricción en profundidad (Taboada y Álvarez, 2008). A continuación se describirán los principales aspectos físicos relacionados con el manejo del agua y la compactación, los cuales pueden representar graves restricciones en los ambientes del E de San Luis.

2.1.1. Importancia del manejo del agua y perfiles hidrológicos

El factor más limitante para la producción de cultivos agrícolas en las regiones semiáridas es el agua (Stone et al., 2001). Las estrategias de manejo del agua en sistemas de producción en regiones semiáridas deben necesariamente abordar problemáticas en la captación, almacenaje, conducción y eficiencia de uso (Quiroga, 2012).

Los suelos pueden ser divididos en cuatro grandes grupos según sus propiedades hidro-

lógicas (captación, almacenamiento y conducción). Estos grupos se denominan perfiles hidrológicos (Moore, 2001). La mayoría de los suelos pueden ser categorizados dentro de los siguientes perfiles hidrológicos: a) suelos uniformes de textura gruesa, b) suelos de textura media a fina, c) suelos de permeabilidad contraste y d) suelos con agrietamiento de arcillas. En nuestra provincia predominan los dos primeros grupos (Figura 2).

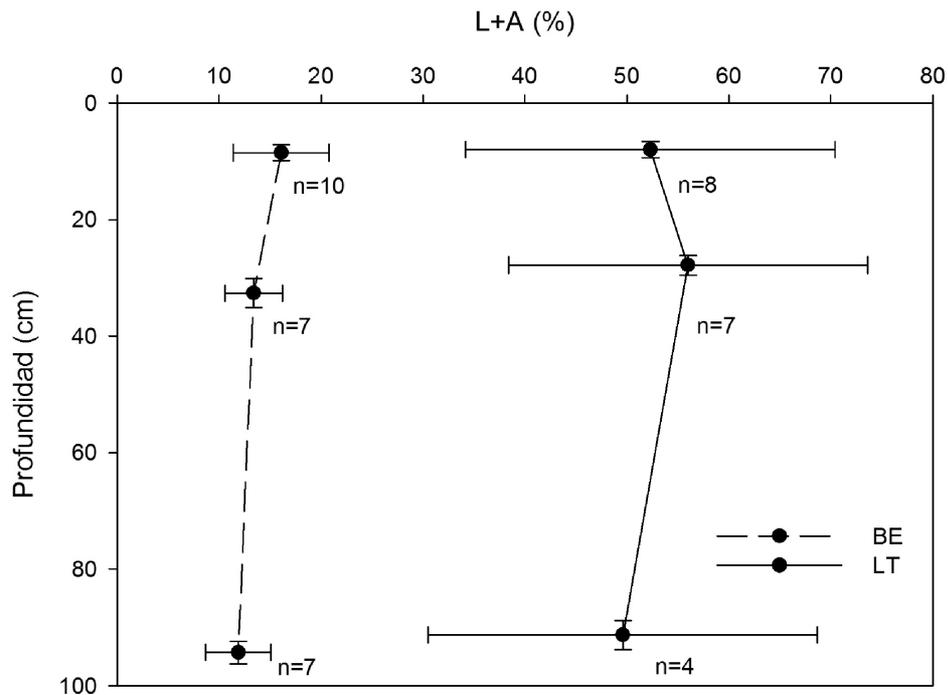


Figura 2. Variación del contenido de limo + arcilla (L+A) en un perfil uniforme de textura gruesa (Serie Buena Esperanza, BE) y en un suelo de textura media a fina (Serie La Toma, LT). Elaborado con datos de Peña Zubiarte et al., inédito.

- **Suelos uniformes de textura gruesa:** estos suelos suelen ser arenosos o arenoso francos, en general son profundos y tienden a ser excesivamente drenados. Son suelos que se ubican principalmente en el sur de la provincia. Sus principales limitantes son la baja capacidad de retención de agua y la susceptibilidad a la erosión eólica, por lo que el manejo de la cobertura es fundamental en estos suelos.
- **Suelos de textura media a fina:** este grupo incluye suelos de textura francas que no poseen una marcada diferencia de permeabilidad entre capas u horizontes. En general se ubican en regiones interserranas. En algunas situaciones sus altos contenidos de limo los hacen susceptibles al endurecimiento y la compactación, restringiendo la captación y conducción del agua, y la profundidad de las raíces.

2.1.2. Principales procesos hidrológicos en el perfil de suelo

Durante una lluvia o riego el agua infiltra dentro del suelo y continúa moviéndose a profundidades mayores, incrementando el contenido de agua en el perfil. Cuando el agua ingresa a un suelo seco, una zona de transmisión con un contenido alto y uniforme de agua

se establece. Al finalizar la infiltración el proceso de redistribución comienza. El frente de mojado continúa su movimiento descendente a tasas decrecientes, el drenaje profundo recargará los acuíferos y simultáneamente el agua será removida como resultado de la evaporación en la superficie y la transpiración de las plantas (Romano y Santini, 2002). A continuación se analiza cada uno de estos procesos y los factores que los condicionan.

2.1.2.1. Captación

El término infiltración denota la entrada de agua al suelo a través de su superficie (Kutilek y Nielsen, 1994). La infiltración es una función de propiedades estructurales y texturales (Figura 3), así como del contenido inicial de agua en el suelo (Lal y Shubra, 2004).

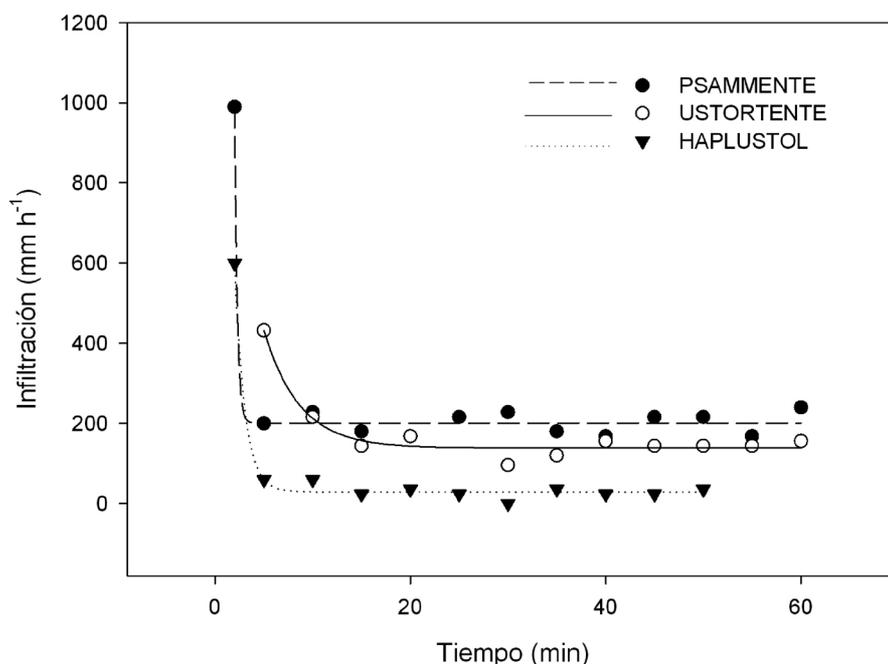


Figura 3. Infiltración instantánea en tres suelos cultivados de granulometría contrastante en la provincia de San Luis. Psammente=82% de arena, Ustortente=77% de arena, Haplustol=29% de arena. Datos gentileza de Juan de Dios Herrero.

En sistemas productivos de secano, donde las lluvias representan la totalidad de agua disponible, una baja infiltración incrementa la probabilidad de perder el agua por evaporación y escurrimiento, disminuyendo la eficiencia de captación, y por ende la eficiencia en el uso del agua (Quiroga, 2010). En sistemas de riego, con equipos de alta pluviometría instantánea la intensidad de aplicación de agua no debe superar la velocidad de infiltración (pendiente de la infiltración acumulada) de un suelo, porque se producen pérdidas por escurrimientos hacia las zonas más bajas (Andriani, 1997).

2.1.2.2. Conducción

Los parámetros de flujo saturado de agua en el suelo describen y cuantifican la habilidad de un medio poroso para transmitir el agua cuando este medio está saturado o cerca de la saturación. Estos parámetros determinan el balance de agua en el suelo, siendo requeri-

dos en los principales métodos de cálculo de balances hídricos (Kirby et al., 2001). La conductividad hidráulica (K_s) es una medida de la habilidad de un suelo de conducir agua bajo un gradiente de potencial hidráulico. Esta es sensible a la textura y estructura del suelo, siendo mayor si el suelo es más poroso y agregado, que en un suelo compactado y denso.

La conductividad hidráulica no solamente depende de la porosidad total de suelos, sino principalmente del tamaño de los poros conductores (Hillel, 1998). Es por ello que suelos arenosos, con menor porosidad total que suelos de textura más finas presentan mayores valores de K_s (Figura 4). Sin embargo como K_s depende del sistema poroso, el cual en la realidad puede resultar muy complejo pueden presentarse situaciones en que la textura determinada en laboratorio no sea un buen predictor, existiendo suelos de textura fina con altas K_s explicadas por la influencia de la estructura (Kirby et al., 2001).

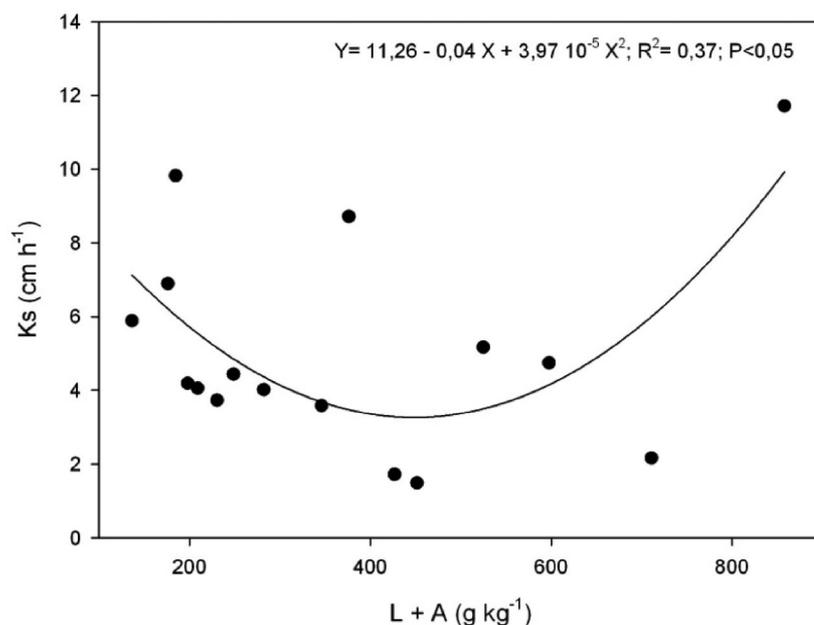


Figura 4. Conductividad hidráulica saturada en función del contenido de limo y arcilla (L+A) en la provincia de San Luis. Datos gentileza de Juan de Dios Herrero.

2.1.2.3. Almacenamiento

La retención del agua en el suelo se refiere a los mecanismos y procesos relacionados con los cambios en el contenido de agua y su estado energético. La relación entre estos dos parámetros se denomina curva característica de retención de agua. De alguna manera esta energía puede ser vista como la cantidad de trabajo necesaria para desplazar una cantidad de agua dada desde el suelo, donde esta retenida, a un estado de agua libre. A medida que el contenido de humedad de un suelo decrece desde saturación, donde no existe retención, la energía de retención aumenta y empiezan a actuar fuerzas capilares y de adsorción. En saturación todos los poros están llenos de agua, y luego en la medida que el suelo se seca, el agua queda retenida en poros de menor diámetro (Taboada et al., 2008).

Esta curva es diferente según el tipo de suelo debido a diferencias en la distribución de tamaño de partículas (textura) y el empaquetamiento entre las mismas. Estas propiedades

determinan la retención de agua debido a que afectan la distribución de tamaño de poros (Gupta y Wang, 2006).

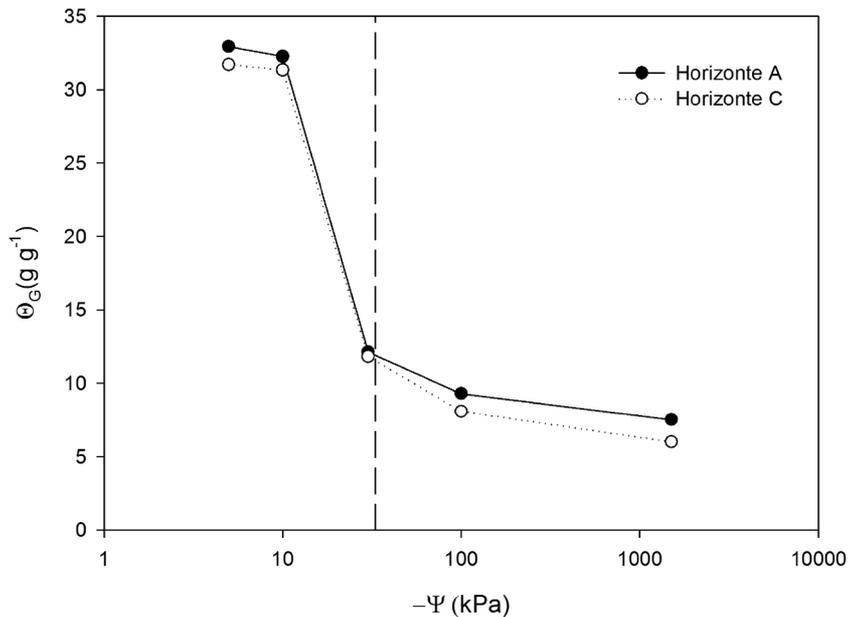


Figura 5. Curva característica de humedad para dos horizontes de un Haplustol Entico serie VILLA MERCEDES, Θ_G = humedad gravimétrica y $-\Psi$ = potencial mátrico. Datos gentileza de Claudio Saenz. La línea cortada indica un potencial mátrico de -33 kPa.

Esta relación entre el contenido de agua y la energía nos permite caracterizar los siguientes parámetros hídricos que son importantes desde el punto de vista del crecimiento vegetal:

Capacidad de campo: se define como la cantidad de agua que es retenida en el suelo luego de drenar el agua gravitacional. En este punto se produce una disminución sustancial de la tasa de movimiento descendente de agua en el suelo. Su valor es variable, pero en muchos suelos oscilaría entre los 10–33 kPa (Taboada et al., 2008). El contenido de materia orgánica y la textura, ambas definiendo la estructura del suelo, son las propiedades más determinantes de su valor.

La capacidad de campo puede ser estimada a campo y se refiere al contenido de agua luego de que un suelo saturado se ha drenado por 24–48 h sin evaporación (Gupta y Wang, 2006; Figura 6). Este valor suele ser superior comparado al mismo determinado en laboratorio (Bell y van Keulen, 1996).

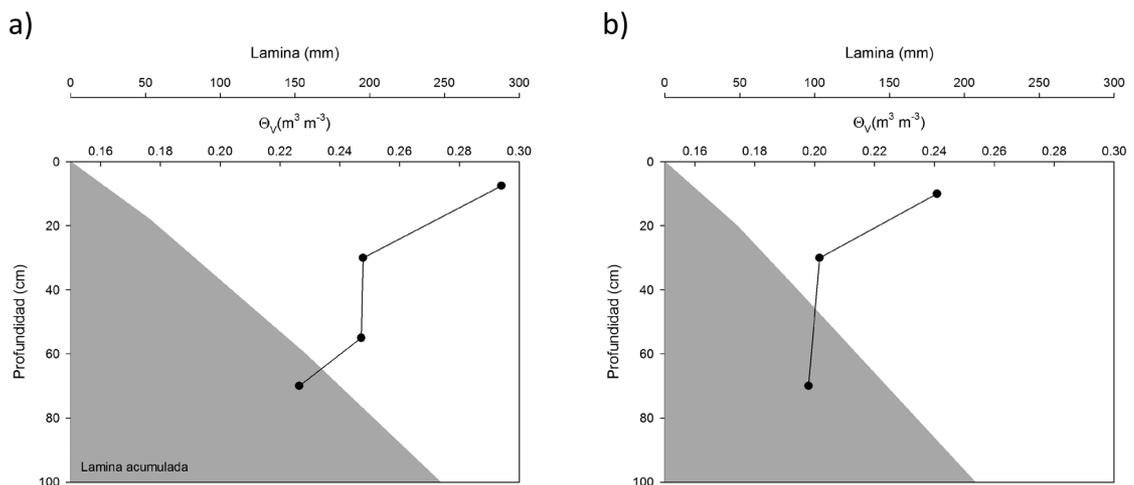


Figura 6. Variación en profundidad de la humedad volumétrica (Θ_v) y la lámina de agua total acumulada en capacidad de campo estimada a campo en a) Torriortente Ústico (Quines) y b) Ustor-tente Típico (Fraga). Elaboración con datos propios y gentileza de Claudio Saenz.

Punto de Marchitez Permanente (PMP): es referido al contenido de agua en donde la energía de retención es tan alta que los vegetales no la pueden absorber alcanzando su estado de marchitez parcial o total como resultado del estrés hídrico. Si bien su valor es variable se ha tomado como valor de referencia -1500 kPa. En el caso de la PMP, la propiedad más determinante es la textura, en especial el contenido de arcilla (Taboada et al., 2008).

La diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente determina la capacidad de un suelo para almacenar agua útil o agua disponible (CAD). Como es de esperarse la CAD varía con la textura. Generalmente suelos de textura media (francos) tienen mayor CAD que suelos de textura más fina (arcillosos) o gruesos (arenosos). Esto se debe a que en los suelos gruesos ambos, CC y PMP son bajos, mientras que en los suelos finos, si bien la CC es alta, también lo es PMP (Gupta y Wang, 2006).

En la Tabla 1 se muestran valores de CAD reportados en la bibliografía para suelos de la provincia de San Luis (Kirby, 1999). A fines prácticos se puede relacionar el contenido de arena con la capacidad de almacenamiento expresada en mm/cm de suelo, o en intervalos regulares que faciliten el muestreo (ej. 20 cm). En este sentido el análisis de suelos en la región pampeana ha permitido inferir la siguiente relación entre el contenido de arena expresado en % y la CAD expresada en mm/20 cm de suelo: 80–90% de arena = 10–12 mm, 60–70% = 15–18 mm; 40–50% = 20–25 mm (Quiroga et al., 2007).

Tabla 1. Capacidad de almacenamiento de agua disponible (CAD) en los primeros 2 m de espesor de los principales suelos de la provincia de San Luis. Textura, carbono orgánico (CO) y estructura del horizonte superficial. A: Arenoso, AF: arenoso-franco, FA: franco-arenoso, F: franco, FL: franco limoso. Tomado de Kirby (1999).

Tipo de Suelo	Textura	CO	Estructura	CAD (mm)
Haplustol Éntico	FA, FL,	1,25	Débil – moderado	180 – 250
Haplustol Típico	FA, F, FL	1,6	Débil – Moderado	180 – 250
Ustipsamente Típico	A, AF	0,7	Ninguna	100 – 130
Torripsamente Típico	A, AF	0,3	Ninguna	100 – 130
Ustortente Típico	AF, FA	0,4	Débil	140
Torriortente Típico	A, FA, FL	0,5	Débil	100 – 180

2.1.3. Aspectos prácticos del manejo del agua

Una forma práctica de expresar la cantidad de agua almacenada en el suelo es en términos de altura o lámina de agua. La unidad de medida más frecuente es el milímetro (mm), que equivale al volumen de 1 L de agua distribuido en una superficie de 1 m². Así la expresión volumétrica del contenido de agua de un suelo se convierte a lámina de agua según la siguiente expresión (Ec. 2):

$$L \text{ (mm)} = HG \text{ (g g}^{-1}\text{)} \times DA \text{ (g cm}^{-3}\text{)} \times D_{\text{AGUA}} \text{ (g cm}^{-3}\text{)} \times e \text{ (mm)} \quad [2]$$

Donde L es igual a la lámina de agua, HG es la humedad gravimétrica, DA es la densidad aparente, D_{AGUA} es la densidad del agua (cuyo valor es 1) y e es el espesor de suelo. Esta forma de expresión es de gran utilidad ya que permite relacionar los fenómenos de la parte aérea (precipitaciones, riego, evapotranspiración) con el funcionamiento del sistema suelo-planta (Taboada et al., 2008). Combinando el concepto de CAD y lámina de agua surge el concepto de lámina de agua disponible (Ec. 3, Taboada et al., 2008).

$$LAD \text{ (mm)} = [HG_{\text{CC}} - HG_{\text{PMP}}] \text{ (g g}^{-1}\text{)} \times DA \text{ (g cm}^{-3}\text{)} \times D_{\text{AGUA}} \text{ (g cm}^{-3}\text{)} \times e \text{ (mm)} \quad [3]$$

Donde LAD es igual a la lámina de agua disponible, HG_{CC} es la humedad gravimétrica en capacidad de campo y HG_{PMP} es la humedad gravimétrica en punto de marchitez permanente. Este término resulta práctico al analizar la viabilidad de un sistema de producción (cría, invernada, tambo, agricultura) en regiones semiáridas donde el agua es el principal

factor limitante (Tabla 2). Reemplazando el término HG_{cc} por el contenido actual de agua en diferentes momentos del cultivo (ej. siembra, V6) también resulta en una herramienta para la toma de decisiones donde puede manejarse el riesgo de prácticas como la fertilización o la elección de lotes de producción propia o arrendamiento (Quiroga, 2012).

Tabla 2. Capacidad de retención de agua (mm) en función del espesor de suelo y del contenido de limo y arcilla (L+A; %). Mayor número de X indica mayor aptitud. Adaptado de Quiroga (2012).

Espesor (m)	L+A (%)				
	20	30	40	50	60
0,4	X	X	X	X	X
0,8	X	XX	XX	XX	XXX
1,2	XX	XXX	XXX	XXXX	XXXX
1,6	XXX	XXXX	XXXX	XXXXX	XXXXX
2	XXXX	XXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX

2.1.4. Aspectos dinámicos de la disponibilidad de agua

El concepto clásico de disponibilidad de agua condujo a una variedad de hipótesis sobre los efectos en el crecimiento vegetal del agotamiento del agua del suelo (Taboada et al., 2008). En un primer momento se pensó que el agua se encontraba igualmente disponible en todo el rango de la CAD (concepto estático). Sin embargo, se demostró que la absorción de agua por las plantas era menor a medida que la disponibilidad de la misma en el suelo disminuía progresivamente (concepto semiestático). También fueron definidas posiciones intermedias en las cuales mediante nociones empíricas fueron desarrollados rangos de agua “fácilmente disponible” y de “disponibilidad decreciente” (Hillel, 1998).

Los modelos más simples se basan en estos conceptos para determinar la frecuencia de riego. Estudios han demostrado que la mayor parte de los cultivos pueden recuperarse de un marchitamiento temporario si no más del 50% del agua disponible ha sido absorbida (Taboada et al., 2008). No obstante, la remoción permitida también depende del tipo de cultivo y su estado fenológico. Combinando estos conceptos surge el concepto de umbrales de riego. Por ejemplo, para el cultivo de soja es recomendado mantener un umbral del 40% de agua útil durante el período entre emergencia y R1, mientras que para el llenado de granos, período crítico, este umbral se eleva a 60% (Andriani, 1997). Se sugiere que estos rangos sean utilizados como teniendo en cuenta el comportamiento del cultivo y las condiciones atmosféricas (Romano y Santini, 2002).

Actualmente, los conceptos estáticos y semiestáticos están siendo reemplazados, y para la evaluación de la disponibilidad de agua, los nuevos enfoques contemplan la dinámica del total de las relaciones suelo-planta-atmósfera, mediante el uso de modelos de simulación.

2.1.5. Determinación del contenido de agua de los suelos

2.1.5.1. Métodos directos e indirectos

La determinación del contenido de agua de los suelos puede ser realizada mediante métodos directos e indirectos. Los primeros hacen referencia a aquellos donde el agua es removida de la muestra, por evaporación, lixiviado (uso de alcohol) o reacciones químicas. El método gravimétrico es el método de referencia para la medición de humedad. La metodología es la siguiente: pesado de la muestra húmeda, remoción del agua y repesado de la muestra para determinar la cantidad de agua removida. La cantidad de agua obtenida es calculada como la diferencia entre el peso húmedo (PH) y el peso seco (PS) de la muestra y es expresada en relación al suelo seco, teniendo en cuenta la tara (T) del recipiente utilizado (Ec. 4). En general se utiliza una temperatura de 105 °C durante 24 h.

$$HG = \frac{(PH + T) - (PS + T)}{(PS + T) - T} \quad [4]$$

Los métodos indirectos involucran la medición de una propiedad del suelo que es afectada por el contenido de humedad o la medición de una propiedad de algún objeto ubicado en el suelo, usualmente poroso, que entra en equilibrio con el contenido de agua en el suelo. El contenido de agua en el dispositivo en equilibrio depende del estado de energía del agua más que del contenido de agua del suelo que entra en contacto. Es por esto que el mismo requiere una calibración con en el suelo donde se realiza la determinación. Las principales propiedades utilizadas para determinar humedad son: a) resistencia eléctrica, b) capacitancia eléctrica, c) absorción y dispersión de rayos gamma, y d) atenuación de neutrones (Kutilek y Nielsen, 1994).

La relación entre la resistencia eléctrica (RE) y el contenido de humedad (Θ) sigue un modelo exponencial o hiperbólico según la Ec. 5, donde a, b y α son constantes empíricas y ΔT es el cambio de temperatura con respecto a una referencia. Para cuantificarlo se utilizan bloques porosos con electrodos insertos. Como desventaja no son muy sensibles en suelos húmedos y no sirven en suelos salinos.

$$RE = \frac{a}{\Theta^b} (1 + \alpha \Delta T) \quad [5]$$

Los métodos basados en la capacitancia dependen de la variación de la constante dieléctrica del suelo en función del contenido de humedad. El TDR (time domain reflectance) corresponde a este tipo de métodos. La absorción y la dispersión de rayos gamma son dependientes de la densidad del suelo y el contenido de humedad de este. El método basado en neutrones usa la habilidad del hidrógeno para desacelerar neutrones de manera más eficiente que otras sustancias. En el suelo, la mayor cantidad del hidrógeno se encuentra en moléculas de agua, por lo que un cambio en la concentración de hidrógeno se debe a cambios en el contenido de agua.

La ventaja principal de estos métodos indirectos es que no son destructivos, la desventaja principal, en el caso de los últimos citados es que el equipamiento puede resultar caro y dependiente de personal capacitado. Por el otro lado, los tensiómetros son instrumentos

que si bien no cuantifican el contenido de humedad de manera directa, ya que miden el potencial del agua en el suelo, son elementos prácticos y baratos para monitorear el suelo cuando se desea mantenerlo en condiciones de humedades próximas a capacidad de campo, ya que trabajan en un rango de potenciales reducido (0–80 kPa).

2.1.5.2. Métodos prácticos de determinación de la humedad

El conocimiento expeditivo del contenido de agua en el suelo resulta relevante para la toma de decisiones en los sistemas de producción en regiones semiáridas. La determinación de la humedad por el método del tacto y la apariencia es uno de los métodos propuestos, el cual con experiencia puede tener un error del 5 % (Quiroga et al., 2007; USDA, 2005). En primer término se debe reconocer los suelos en seco (diferencias texturales) y luego en dos estados de humedad correspondientes a 50 y 100 % de agua útil. Para ello, el operador debe observar la capacidad de la muestra de suelo para convertirse en bola o cinta, su firmeza, la aspereza de la superficie de la bola, el brillo del agua, las partículas sueltas, las manchas que deja el suelo/agua en los dedos y el color del suelo. (Nota: una bola demasiado débil se desintegrará con un simple rebote en la mano. Una bola débil se desintegra después de dos o tres rebotes). Luego ir con pala–barreno y sacar muestras de suelo cada 20 cm hasta la profundidad deseada. Al tacto calcular cuántos milímetros de agua tiene cada capa y obtener los milímetros totales en el perfil. Para ello se debe comparar las observaciones con los valores estimados de agua útil según la Tabla 3.

Tabla 3. Descripción y contenido de agua útil (mm) en una muestra de suelo de 20 cm de espesor según el contenido de arena y la proporción de agua útil.

Proporción de agua útil (%)	Contenido de Arena (%)		
	> 80	80 – 60	60 – 40
0	Seco, suelto, los granos de arena quedan en la mano cuando se aplica presión.	Seco, forma una pelota muy débil con granos que se desprenden fácilmente de la pelota.	Seco, los agregados de suelo se rompen fácilmente, sin humedad entre los dedos, los terrones de suelo se desmenuzan aplicando presión.
50	Ligeramente húmedo, forma una pelota muy débil con granos de arena sueltos y agregados en los dedos, no forma una cinta.	Ligeramente húmedo, forma una pelota débil con marcas de dedos definidas, con muy poca cantidad de agua remanente en los dedos, no se pega.	Ligeramente húmedo, forma una pelota con muy poca agua remanente entre los dedos, forma una cinta débil entre el pulgar y el dedo índice.
100 (Capacidad de campo)	4 - 6 mm Mojado, forma una pelota débil, la arena suelta o agregada permanece en los dedos, se moja mucho la palma de la mano.	6 – 8 mm Mojado, forma una pelota blanda, una película de agua aparece luego de apretarla, se moja mucho la palma de la mano.	8 - 12 mm Mojado, forma una pelota blanda, una película de agua aparece luego de apretarla, se moja mucho la palma de la mano.
	10-12 mm	12 – 18 mm	18 – 25 mm

2.3. Compactación

Podemos definir a la compactación como la pérdida de macro porosidad del suelo. Estos macro poros ($>250 \mu\text{m}$) tienen la función en el suelo de: proveer una adecuada aireación, permitir el movimiento de agua hacia y dentro del perfil, y permitir el crecimiento radicular (Figura 7). Una compactación se considera excesiva para el crecimiento de las raíces cuando estas deben superar una presión de 2-3 MPa.

La susceptibilidad a la compactación de horizontes superficiales de suelos agrícolas se encuentra relacionada con el contenido de materia orgánica del suelo, por lo tanto la recuperación de suelos compactados comprende la recuperación de los contenidos de materia orgánica, y consecuentemente la recuperación de parámetros estructurales determinantes de la macro porosidad, (principalmente $>100 \mu\text{m}$). En la medida en que el manejo no logre incidir positivamente sobre la materia orgánica resultará necesario utilizar equipamiento específico para abordar zonas compactadas (Casagrande et al., 2009).



Figura 7. Raíz de soja mostrando síntomas de crecimiento lateral por compactación en un Haplustol Entico, serie NASCHEL. Fotografía gentileza de Maximiliano Eiza.

El parámetro más utilizado para predecir la respuesta de los cultivos a las condiciones de impedancia mecánica es la resistencia a la penetración (Taboada et al., 2008b). Esta es una medida relativa de la presión que las raíces deben ejercer para crecer dentro del suelo. Se relaciona negativamente con la humedad y la porosidad, y positivamente con la densidad aparente (Kruger, 2005).

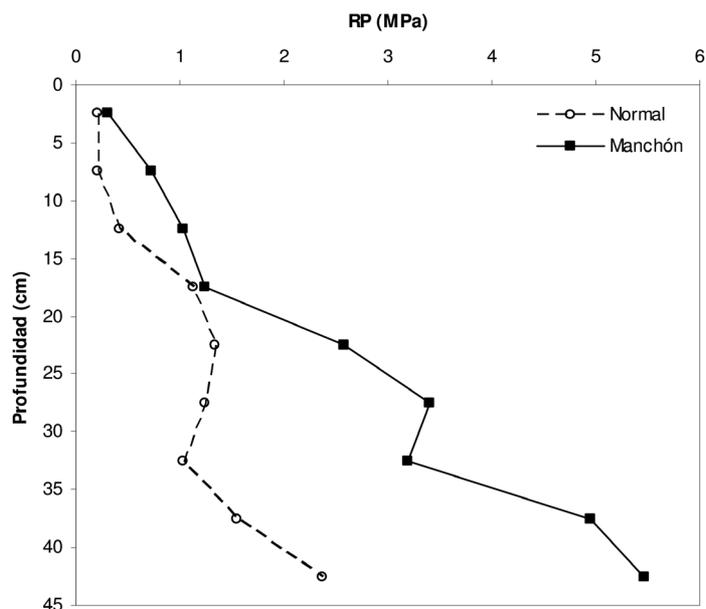


Figura 8. Perfil de resistencia a la penetración (RP) en dos situaciones dentro de un mismo lote en un Haplustol Entico serie NASCHEL: Normal = cultivo de maíz con crecimiento normal, Manchón: cultivo de maíz de menor crecimiento. Datos sin publicar.

Otra determinación común en estudios de compactación es la densidad aparente. Relaciona el peso de suelo con una unidad de volumen. La densidad aparente se relaciona inversamente proporcional con la porosidad total, por lo que suelos de textura fina tienen menor densidad aparente que suelos de texturas más gruesas (Figura 9). El contenido de materia orgánica afecta negativamente a la densidad aparente (Kruger, 2005).

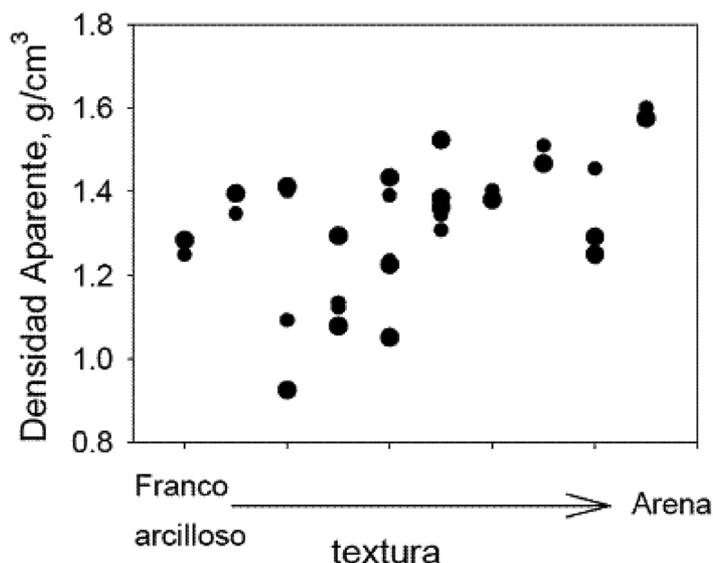


Figura 9. Relación entre la densidad aparente y textura en suelos de San Luis. Tomado de BRS (2000).

Por último, el test proctor, un test originalmente usado en estudios de ingeniería civil, sirve para determinar la relación entre la densidad aparente y la humedad de muestras de suelos (Kruger, 2005). Estas curvas permiten conocer los valores de densidad máxima y humedad crítica que puede alcanzar un suelo, así como su susceptibilidad a la compacta-

ción, la cual se expresa por la pendiente de la rama ascendente de la curva (Taboada et al., 2008b). En general, las curvas se desplazan hacia abajo y a la derecha a medida que aumenta la proporción de limo y arcilla (Figura 10), y la susceptibilidad a la compactación disminuye a medida que aumenta el contenido de materia orgánica.

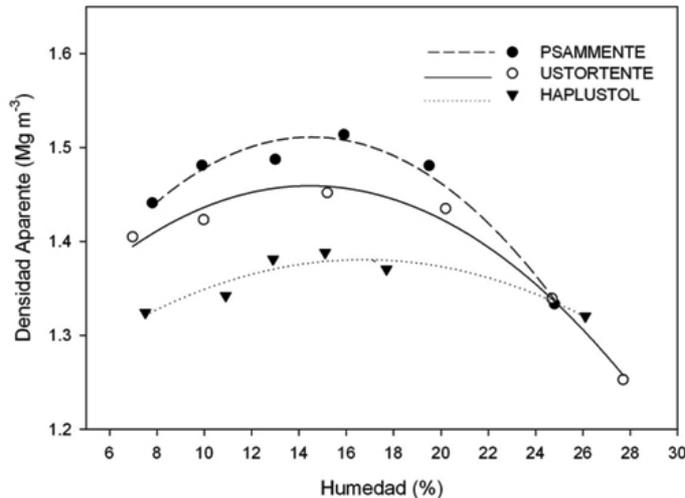


Figura 10. Relación entre la densidad aparente y el contenido de humedad gravimétrica de horizontes superficiales de tres suelos cultivados con granulometría contrastante en la provincia de San Luis. Datos gentileza de Juan de Dios Herrero.

4. Consideraciones finales

- El exceso de sales solubles dificulta principalmente la absorción de agua, por lo que se considera una limitante de primer orden.
- La fertilidad física estudia los procesos y mecanismos físicos que afectan el crecimiento de los cultivos. La capacidad del suelo para almacenar agua y la compactación son dos aspectos fundamentales en nuestros suelos para una correcta gestión del agua y un adecuado crecimiento de las raíces.

5. Bibliografía

- Allen, R.G.; L.S. Pereira; D. Raes y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje 56. FAO, Roma. 323 pp.
- Andrani, J.M. 1997. Uso del agua y riego. Pp 141–150. En: LM Giorda y H Baigorri (Ed.), El cultivo de soja en Argentina. INTA.
- Bell, M.A. y H. van Keulen. 1996. Effect of soil disturbance on pedotransfer function development for field capacity. Soil Tech. 8: 321–329.
- BRS. 2000. Evaluación de posibilidades físicas y económicas de riego con aguas subterráneas en la provincia de San Luis. 239 pp.
- Casagrande, J.; A. Quiroga; I. Frasier y J.C. Colazo. 2009. Aspectos de la evaluación y el manejo de suelos afectados por compactación en San Luis. Pp 15–21. En: A. Quiroga; J. Casagrande y J.C. Colazo (Ed.), Aspectos de la evaluación y el manejo de los suelos en el este de San Luis. Información Técnica 173, INTA San Luis.
- Echeverría, J.C. y A. d'Hiriart. 2006. Permeabilidad y salinidad de los suelos. Pp 23-25. En: J.C. Echeverría, E. Jobbagy y A.D. Collado (Ed.), Aptitud forestal de la provincia de

- San Luis. INTA y Gobierno de San Luis.
- Gupta, S.C. y D. Wang. 2006. Water retention in soil. Pp 1864–1869. In: R Lal (Ed.), *Encyclopedia of Soil Science*. 2nd Edition. Taylor y Francis. 2060 pp.
- Hillel, D. 1998. *Environmental soil physics*. Academic press. 801 pp.
- Kirby, J.M. 1999. Uso sostenido y balance del agua para riego en la provincia de San Luis. BRS, Canberra, Australia.
- Kirby, J.M.; R. Kingham y M. Cortes. 2001. Texture, density and hydraulic conductivity of some soils in San Luis province, Argentina. *Ci. Suelo (Argentina)* 19: 20–29.
- Kruger, H.R. 2005. Suelos compactados. Herramientas de diagnóstico y crecimiento de cultivos. Apuntes del curso para graduados de Física de suelos. UNLPam. 12 pp.
- Kutilek, M. y D.R. Nielsen. 1994. *Soil hydrology*. Catena Verlag GMB. 370 pp.
- Lal, R. y M.K. Shubra. 2004. *Principles of soil physics*. Marcel Dekker, Inc. 699 pp.
- Lavado, R.S. y M.A. Taboada. 2007. Alteraciones de la fertilidad del suelo causadas por halomorfismo. Pp 1-44. En: MA Taboada y RS Lavado (Ed.), *Alteraciones de la fertilidad de los suelos. El halomorfismo, la acidez, el hidromorfismo y las inundaciones*. Editorial FAUBA, Buenos Aires. 160 pp.
- Moore, G. 2001. *Soil Guide. A handbook for understanding and managing agricultural soils*. 2nd Edition. *Agriculture Western Australia Bulletin* 4343. 381 pp.
- Peña Zubiarte, C.A.; A. d'Hiriart y J.C. Colazo. Inédito. Datos analíticos del reconocimiento de suelos de la provincia de San Luis. 742 pp.
- Quiroga, A.R. 2010. Gestión del agua en producciones de secano en la Región Semiárida Pampeana. En *Actas del I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Azul*. (En CD).
- Quiroga, A.R. 2012. Necesidad de reconocer, jerarquizar y categorizar factores que afectan la producción y sustentabilidad. Pp 5–9. En: A Corro Molas y E Ghironi (Ed.), *Avances en agricultura por ambientes en la región semiárida pampeana*. Publicación Técnica 90. EEA INTA Anguil.
- Quiroga, A.R.; R. Fernández, P. Azcarate y A. Bono. 2007. Agua del suelo. Bases funcionales para su manejo. Pp 35-50. En: A Quiroga y A Bono (Ed.), *Manual de fertilidad y evaluación de suelos*. Publicación Técnica 71. INTA Anguil.
- Romano, N. y A. Santini. 2002. Field. Pp 721–738. In: JH Dane y GC Topp (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 4-Physical methods*. SSSA Book series 5. SSSA y ASA. Madison, WI, EE.UU. 1692 pp.
- Stone, L.R.; D.E. Goodrum; M.N. Jaafar y A.H. Khan. 2001. Rooting Front and water depletion depths in grain sorghum and sunflower. *Agron. J.* 93: 1105-1110.
- Taboada, M.A. y R.S. Lavado. 2008. Funcionamiento de los suelos salinos y sódicos. Pp 339–348. En: *Actas del XVI congreso de AAPRESID*.
- Taboada, M.A.; F. Damiano y F.G. Micucci. 2008. Aspectos físicos que condicionan la disponibilidad de agua para los cultivos. Pp 31–65. En MA Taboada y CR Álvarez (Ed.), *Fertilidad Física de los suelos*. Editorial FAUBA.
- Taboada, M.A.; F.G. Micucci y C.R. Álvarez. 2008b. Impedancias mecánicas y compactación en suelos agrícolas. Pp 93–150. En MA Taboada y CR Álvarez (Ed.), *Fertilidad Física de los suelos*. Editorial FAUBA.
- USDA. 2005. Estimating soil moisture by feel and appearance. *USDA Technical Notes*. 6 pp.

Nitrógeno

Juan Cruz Colazo
EEA INTA San Luis

1. Funciones y ciclo

El nitrógeno es el nutriente que con mayor frecuencia limita el crecimiento de los cultivos en el mundo (Echeverría et al., 2009). El contenido de N en la biomasa de las plantas varía entre 1 y 5%. Su rol principal es la formación de proteínas, y cumple otro rol importante como parte integral de la molécula de clorofila, la cual absorbe la energía de la radiación solar, necesaria para la fotosíntesis. La Figura 1 muestra un esquema simplificado del ciclo del N. Teniendo en cuenta el sistema suelo-planta-atmósfera, el mismo involucra muchas transformaciones entre formas orgánicas e inorgánicas, coexistiendo procesos de ganancia, pérdida y el ciclado dentro del suelo (Echeverría y Sainz Rozas, 2006).

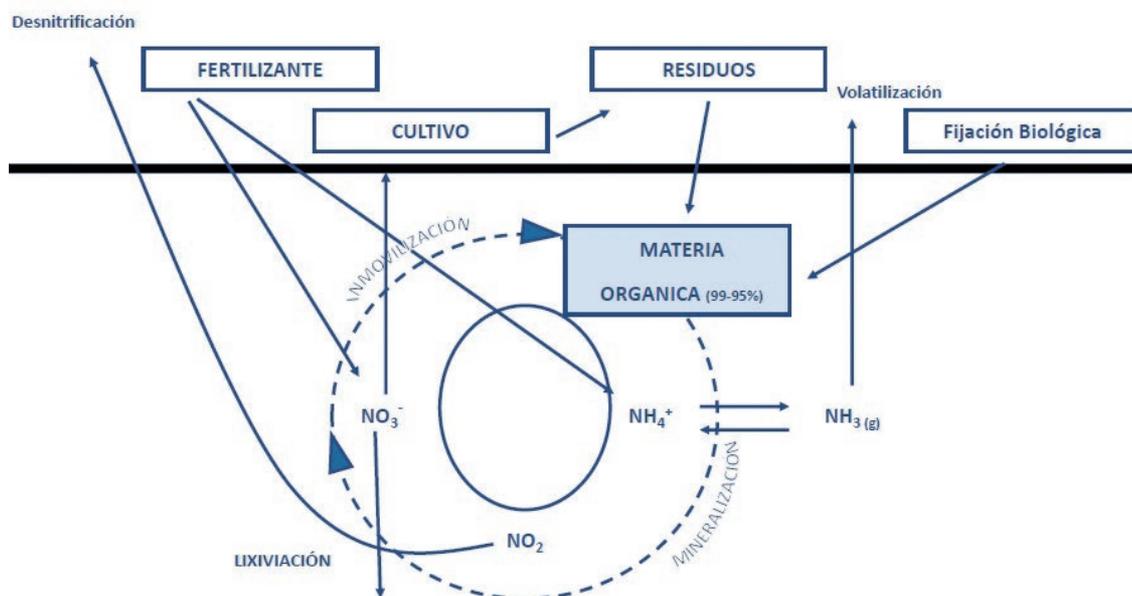


Figura 1. Ciclo del nitrógeno. Adaptado de Echeverría y Sainz Rozas (2006).

Las ganancias se originan por la fijación biológica, la adición de fertilizantes y abonos orgánicos, y en menor medida por las precipitaciones. Las transformaciones incluyen a la fijación de amonio, la mineralización y la inmobilización. En cuanto a las pérdidas, estas pueden producirse en forma gaseosa, por volatilización o desnitrificación, y de manera líquida, por lixiviación o escurrimiento (Echeverría et al., 2009).

Las pérdidas del sistema afectan la eficiencia en el uso del N. Las pérdidas por desnitrificación se producen en condiciones de anaerobiosis, y por su magnitud son de escaso valor agronómico. Las pérdidas por volatilización se producen principalmente por aplicaciones de urea en superficie, y son favorecidas al incrementarse la temperatura, la dosis de N, el pH y el nivel de residuos. Estas pérdidas pueden representar hasta el 30% del N

aplicado. Las pérdidas por lavado son relevantes en suelos de buena infiltración, suelos con altos contenidos de nitratos, altas dosis de N y cuando las precipitaciones superan a la evapotranspiración. En estas condiciones las pérdidas de N pueden representar el 50% del N aplicado.

Los principales procesos de reciclado son el aporte de nitrógeno bajo la forma de residuos, la descomposición de residuos con liberación de N al componente mineral, la humificación de la otra parte de N, la mineralización de N desde la materia orgánica (MO) que aporta N al componente mineral, la absorción de N mineral por parte de las plantas y la inmovilización. La intensidad del proceso de mineralización depende principalmente del tamaño del sustrato orgánico, la temperatura y la humedad del suelo. La temperatura óptima varía entre 25–35 °C y la humedad en valores cercanos a la capacidad de campo. También se han observado efectos negativos debido a la aplicación de fertilizantes con N (Álvarez y Steinbach, 2010).

En suelos arenosos-francos el aporte por mineralización rondaría los 40–70 kg de N ha⁻¹, dependiendo si el nivel de MO se encuentra por debajo o por encima del 1 % (Romano, comunicación personal). La inmovilización es el proceso inverso a la mineralización y se produce cuando se agrega al suelo residuos con una alta relación C/N (>30), de manera que los requerimientos de N de los microorganismos no pueden ser abastecidos por el N presente en el residuo. Si esta es muy alta durante el ciclo de cultivo las plantas podrían mostrar síntomas de deficiencia de N.

El aporte por precipitaciones es de escaso valor agronómico, en la región semiárida pampeana se estima en 3-4 kg ha⁻¹ durante el ciclo de cultivos estivales (Álvarez y Steinbach, 2010). La fijación biológica de N (FBN) es una vía de entrada importante en sistemas mixtos con pasturas en base a alfalfa. Estudios realizados en diferentes regiones agroclimáticas han medido valores de fijación de 100–300 kg de N ha⁻¹ año⁻¹, en un gradiente semiárido–húmedo, siendo más intensa la fijación en alfalfares de mayor producción (Racca et al., 2001). Sin embargo, estudios realizados en regiones semiáridas han encontrado que el balance de N podría ser negativo o neutro en función de los niveles de P en el suelo y el manejo realizado (Bono y Faggioli, 1994). Estimaciones utilizando rendimientos medios de la provincia (Funes, 2004) indicarían que la FBN serían del orden de los 90–180 kg de N ha⁻¹. En cuanto al cultivo de soja, se han reportado valores de fijación del orden de 90 kg de N ha⁻¹, siendo negativos los balances de N por encima de los 1,6 Mg de grano ha⁻¹, y similares estos balances al de cereales sin fertilizar (Álvarez y Steinbach, 2010).

2. Requerimiento de los cultivos

La disponibilidad de nutrientes minerales es determinante del crecimiento de los cultivos. Las deficiencias de N reducen el área foliar del cultivo, explicado en maíz y girasol por la disminución en el tamaño de las hojas, y en soja por una menor ramificación. Los requerimientos por unidad de rendimiento se asocian directamente al contenido de proteína en grano que ronda el 10, 18 y 40% para maíz, girasol y soja respectivamente (Andrade et al., 2000).

Tabla 1. Requerimientos de N por unidad de grano, índice de cosecha de N (IC) y exportación de N por unidad de grano de los principales cultivos de cosecha. Valores de humedad: maíz y sorgo (14%), trigo y soja (13,5%) y girasol (12,5%). Tomado de García y Correndo (2013).

Cultivo	Requerimientos de N (kg N Mg ⁻¹)	IC (%)	Exportación (kg N Mg ⁻¹)
Maíz	22	68	13
Sorgo	30	66	17
Trigo	30	69	18
Soja	75	73	47
Girasol	40	60	21
Maní	69	64	38

3. Formas de absorción

El N es absorbido bajo la forma de nitrato (NO₃⁻) y/o amonio (NH₄⁺). En suelos agrícolas templados prevalece la forma de NO₃⁻. Ambos iones ingresan a la planta principalmente por flujo masal, es por ello que: a mayores concentraciones de agua en el suelo, concentración de estos iones en la solución y tasa transpiratoria de la planta, mayor será la absorción de N (Abbate y Andrade, 2006).

4. Estrategias de fertilización

4.1. Selección de la dosis

En la región pampeana se ha trabajado intensamente buscando definir las posibles relaciones entre los componentes del nitrógeno del suelo con el rendimiento de los cultivos. De las variables más estudiadas para explicar el rendimiento de los cultivos el nitrógeno mineral, generalmente expresado como la suma del nitrógeno de nitratos del suelo y el nitrógeno del fertilizante, ha sido la más utilizada (Álvarez y Steinbach, 2010). La estimación de la disponibilidad inicial de N mediante esta metodología es una aproximación empírica simple que permite realizar en forma simultánea el diagnóstico de la fertilidad y la eventual recomendación de fertilizante nitrogenado a agregar. Este motivo hace que su utilización sea muy práctica presentando un alto nivel de adopción (Ferrari, 2009).

En el cultivo de maíz existe abundante información en diferentes ambientes de la región pampeana húmeda, especialmente del S de Santa Fe, Entre Ríos y E de Buenos Aires, que difieren en cuanto a los valores umbrales alcanzados (Salvagiotti et al., 2002). La comparación de modelos propuestos para estimar valores umbrales de nitrógeno mineral ha mostrado una amplitud de valores desde 50 a 450 kg de N ha⁻¹, cuyas diferencias no solamente pueden atribuirse a factores ambientales, de manejo, profundidad y de muestreo, sino también a la falta de dominio de las redes experimentales y a las estrategias de análisis utilizadas (Álvarez y Steinbach, 2012). En cambio, en la región semiárida-subhúmeda pampeana los estudios sobre esta metodología son más escasos y con resultados poco satisfactorios (Bono y Álvarez, 2012; Saks et al., 2010).

En molisoles de regiones semiáridas, la productividad y la respuesta a la fertilización de maíz se encuentran estrechamente relacionadas con el gradiente de precipitaciones (Quiroga et al., 2006). Teniendo en cuenta estos aspectos, los niveles de suficiencia de N en regiones semiáridas–subhúmedas son diferentes, en función de ambientes con distinto potencial de rendimiento determinados principalmente por el agua disponible (Colazo, 2012). Con valores de precipitaciones durante el ciclo del cultivo menores a 600 mm y rendimientos máximos cercanos a 11 Mg ha⁻¹, los niveles de suficiencia fueron de aproximadamente 150 kg de N ha⁻¹, mientras que con precipitaciones mayores a 600 mm y rendimientos máximos cercanos a los 13 Mg ha⁻¹ los niveles de suficiencia fueron próximos a los 200 kg de N ha⁻¹ (Figura 2).

Estos mayores umbrales en ambientes con mayores potenciales de rendimientos coinciden con los encontrados en regiones húmedas, donde los umbrales propuestos varían

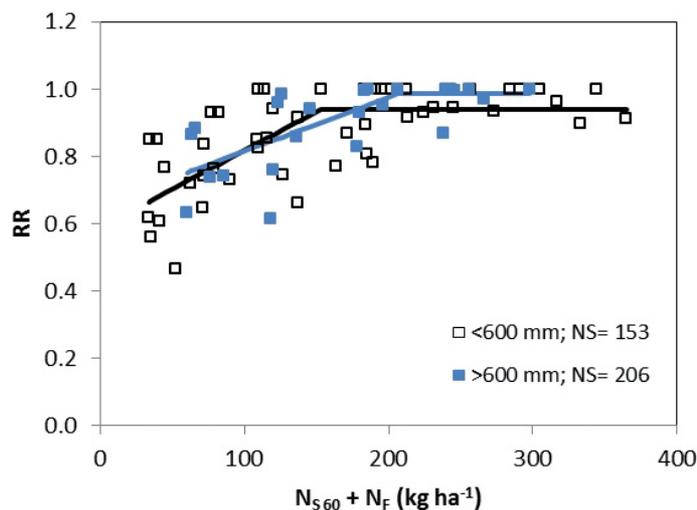


Figura 2. Rendimiento Relativo (RR) de maíces en secano en función de la suma del nitrógeno de nitratos en el suelo (V6) en los primeros 60 cm del perfil y el aplicado como fertilizante ($N_{S60} + N_F$) para dos conjuntos de datos con precipitaciones contrastantes durante el ciclo del cultivo a) <600 mm y b) >600 mm. Rendimiento máximo promedio: a) ≈ 11 y b) ≈ 13 Mg de grano ha⁻¹. MO = 2.2%. Adaptado de Colazo (2012).

entre 140 y 160 kg de N ha⁻¹ dependiendo si el potencial de rendimiento de maíz es mayor o menor a 10 Mg ha⁻¹ (Salvagiotti et al., 2010). En regiones semiáridas esta misma tendencia fue observada cuando se analizaron diferentes ambientes topográficos con distintos niveles de agua útil en el perfil de suelo (Gregoret et al., 2006).

Si bien no existe información local sobre niveles de suficiencia en planteos de secano, se podría suponer que para rendimientos objetivos de 6–8 Mg ha⁻¹, los niveles de suficiencia podrían encontrarse entre 100–125 kg de N ha⁻¹, siendo variables en función de los niveles de MO de los suelos. En cuanto a la dosis, el análisis de una red de ensayos de 10 años de experimentación, en los cuales se incluían suelos de la región semiárida, las dosis de 40-60 kg de N ha⁻¹ fueron las más eficientes, mostrando valores por encima del umbral económico (Bono y Álvarez, 2012).

En sorgo granífero, la información es más escasa que en maíz. Para la recomendación de la fertilización nitrogenada se tienen en cuenta factores relacionados con: a) el suelo: fertilidad actual=N como nitratos ($N-NO_3$), y fertilidad potencial=N total (Nt) y materia orgánica (MO); b) la planta: rendimiento objetivo; c) el ambiente: disponibilidad de agua (agua disponible a la siembra + precipitaciones); y d) el manejo: cultivo antecesor y sistema de labranza, aunque estos dos factores repercuten indirectamente en la disponibilidad de $N-NO_3$ y de agua a la siembra (Colazo, 2012b). En San Luis la dosis de N es función del nivel de rendimiento objetivo, que es dependiente principalmente del nivel de agua disponible para el cultivo. Así, en Los Molles, con precipitaciones mayores a 400 mm durante el ciclo del cultivo, rendimientos de grano cercanos a los 10 Mg ha^{-1} fueron alcanzados con dosis de fertilizantes de 80 kg de N ha^{-1} , mientras que en Villa Mercedes, con precipitaciones menores a 350 mm, niveles de 6 Mg ha^{-1} se lograron con dosis cercanas a los 30 kg de N ha^{-1} (Bongiovanni et al., 2012; Colazo et al., 2012).

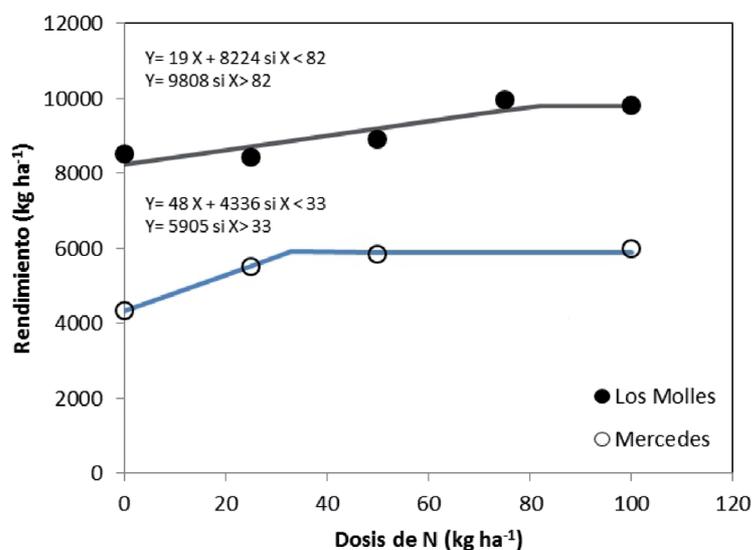


Figura 3. Rendimiento de sorgo granífero en función de la dosis aplicada de N en dos localidades de San Luis: Los Molles y Mercedes. Adaptado de Bongiovanni et al. (2012) y Colazo et al. (2012).

En girasol, en ensayos realizados en el S de la provincia se ha observado respuesta a la fertilización con N (Bono et al., 2000; Bono et al., 2003; Bono et al., 2007; Figura 4). Las condiciones para una alta probabilidad de respuesta a N son: suelos cercanos a capacidad de campo al momento de la siembra, con menos de 40 ppm de nitratos en los primeros 20 cm y valores del índice MO/(limo + arcilla) menores a 4-5; siendo las dosis más eficientes las cercanas a 40 kg de N ha^{-1} (Bono y Álvarez, 2007; Bono y Romano, 2008).

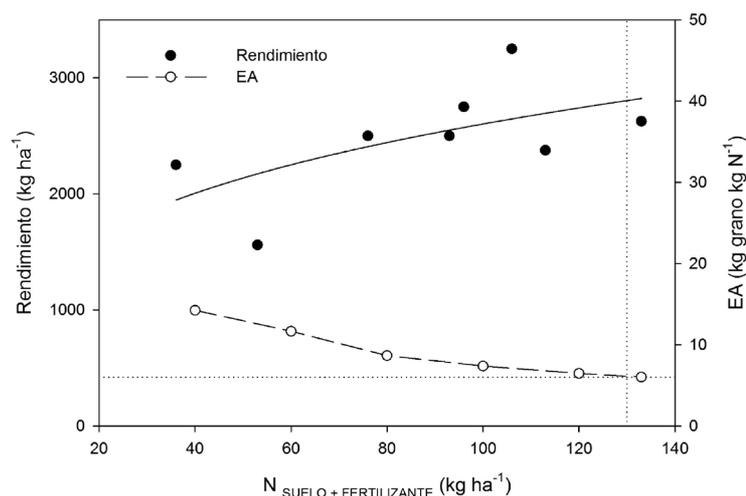


Figura 4. Rendimiento y eficiencia agronómica (EA) de girasol en función de la suma del nitrógeno como nitratos en los primeros 60 cm del suelo y el aplicado como fertilizante en Nueva Galia durante la campaña 2002-2003. Elaborado con información publicada por Bono et al. (2003). La línea punteada horizontal indica la relación de precios entre la unidad de nutriente y grano (6).

4.2. Tecnologías de fertilización

4.2.1. Selección del fertilizante

En cultivos de verano, en ensayos que comparan urea frente a UAN (las dos fuentes más comercializadas) no han existido diferencias en rendimiento (Zubillaga y Zubillaga, 2012). Estudios recientes en condiciones ambientales similares a las de San Luis (suelos de textura gruesa y siembras tardías) han demostrado que las pérdidas por volatilización de urea fueron del 25–40% de N aplicado, sin embargo las mismas no representaron una diferencia en la eficiencia de uso de N y en el rendimiento de maíz, comparado con dosis similares de UAN (Romano y Bono, 2012). Por lo tanto, la selección del fertilizante dependerá de la disponibilidad del producto, preferencias del servicio de ventas, logística de almacenamiento y aplicación, y por supuesto el precio por unidad de N. Un aspecto a destacar es la posibilidad de utilizar fertilizante líquidos que combinan N y S en diferentes proporciones, así como también la incorporación de micronutrientes como el Zn (Tabla 2).

Tabla 2. Estructura química, grado (expresado como nitrógeno elemento), contenido de otros nutrientes (grado de S y Zn) y precio por unidad de fertilizante (tonelada) y nitrógeno (kg). Datos elaborados con información de Melgar (2012), Márgenes Agropecuarios (2012). TSA= Tiosulfato de amonio, SZn=sulfato de Zn.

Nombre	Formula Química	N (%)	Otros nutrientes (%)		Precio	
			S	Zn	u\$s/ton	U\$s/kg N
Urea	CO(NH ₂) ₂	46	-	-	650 ¹	1,4
UAN 32	CO(NH ₂) ₂ + NH ₄ NO ₃	32	-	-	465 ²	1,45
UAN 30	UAN + TSA	30	2,6	-	450 ²	1,5
UAN 28	UAN + TSA	28	5,2	-	445 ²	1,6
UAN 27	UAN + TSA+SZn	27	5	0,4	480 ²	1,8

1. Valores al 1/10/2012. Revista Márgenes Agropecuarios 328. Los precios no incluyen IVA. 2. Matías Saks, comunicación personal.

4.2.2. Momento de aplicación

El mejor momento de aplicación de N es durante el período de mayor exigencia, procurando sincronizar la oferta del nutriente con un sistema radicular capaz de absorberlo y de esta forma aumentando la eficiencia de recuperación del fertilizante. En secano el momento de fertilización nitrogenada dependerá de la interacción entre el nitrógeno edáfico, las precipitaciones, los requerimientos potenciales del cultivo y aspectos logísticos relacionados con la disponibilidad de maquinaria y financiamiento.

En ambientes donde no existe riesgo de lixiviación de nitratos (elevadas precipitaciones durante siembra–estado de seis hojas en cultivos de verano), las aplicaciones a la siembra y postergadas muestran eficiencias similares (Zubillaga y Zubillaga, 2012). En regiones semiáridas, donde definir un rendimiento objetivo es difícil, debido a deficiencias hídricas o problemas de implantación del cultivo, las estrategias de fertilización postergada muestran una ventaja, ya que permiten tener en cuenta estos aspectos, disminuyendo el riesgo al momento de decidir la fertilización. La desventaja de la fertilización postergada es su mayor costo operativo frente a la posibilidad de contar con una sembradora con un sistema de fertilización adecuado.

Las fertilizaciones fraccionadas buscan sincronizar las demandas de N del cultivo con el aporte edáfico y del fertilizante. En planteos en secano cuando las dosis son altas (>50 kg de N ha⁻¹) y los niveles de nitrógeno a la siembra son bajos, es aconsejable fraccionar la dosis: 30-50% a la siembra y el resto de manera postergada. En planteos bajo riego, debido al mayor riesgo de lixiviación y los mayores rendimientos esperados, es aconsejable fraccionar la dosis en dos o tres momentos. En estos ambientes es posible mejorar la eficiencia de uso de N frente a estrategias de fertilización en un solo momento (Colazo, 2013; Figura 5).

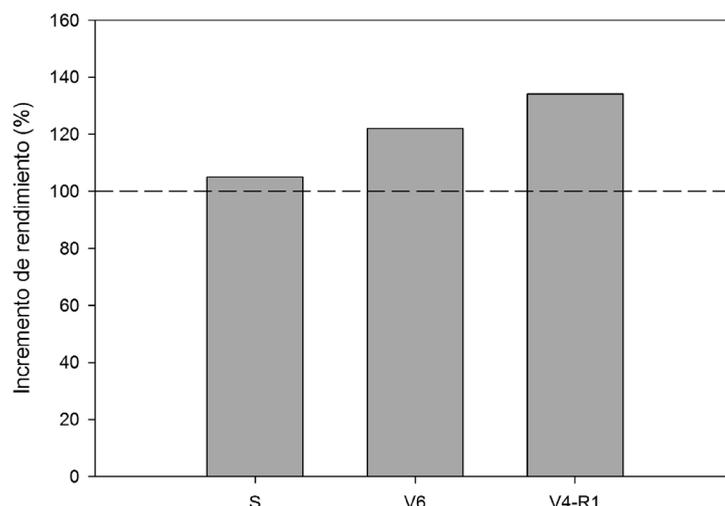


Figura 5. Incremento de rendimiento de maíces bajo riego respecto al testigo (testigo=8980 kg ha⁻¹) de tres estrategias de fertilización nitrogenada: completo a la siembra, completo en estado de seis hojas desarrolladas (V6) y tres aplicaciones entre V4 y R1, en un Ustortente Típico serie FRAGA. Dosis de N=245 kg ha⁻¹. Adaptado de Colazo (2013).

4.2.3. Ubicación del fertilizante

Las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados pueden realizarse en cobertura o en bandas, al momento de la siembra y postergadas. Aplicaciones en cobertura de fertilizantes líquidos pueden ser utilizadas antes de la emergencia del cultivo, siendo la aplicación en banda o “chorreado” la forma de aplicación recomendada posteriormente. Aplicaciones postergadas de UAN en maíz del orden de los 20–40 kg de N ha⁻¹ fueron más eficientes cuando fueron dirigidas a la base de la planta en maíz (Melgar, 2012b).

Los fertilizantes sólidos pueden aplicarse al momento de la siembra, incorporando el fertilizante en bandas al costado o en la línea de siembra. Estas últimas pueden producir efectos fitotóxicos debido a un efecto salino a la liberación de amoníaco. Este efecto depende del cultivo, la capacidad de intercambio catiónica, que depende de la textura, y el estado de humedad al momento de la siembra. La dosis que se puede aplicar disminuye a medida que se incrementa el distanciamiento entre hileras. Las dosis orientativas máximas en suelos arenosos y cultivos de maíz son de 10-15 kg de N ha⁻¹ (Romano, 2012). Por lo tanto las aplicaciones de dosis mayores de N se recomiendan realizarlas al costado de la línea de siembra.

5. Consideraciones finales

- El nitrógeno es el principal nutriente que limita la producción de los cultivos.
- Se absorbe principalmente bajo la forma de nitratos.
- La estimación de la disponibilidad inicial de N mediante la sumatoria del N de nitratos y el N del fertilizante es una aproximación empírica simple que permite realizar en forma simultánea el diagnóstico de la fertilidad y la eventual recomendación de fertilizante nitro-

genado a agregar. Esta es dependiente del nivel de rendimiento objetivo, que en estos ambientes está fuertemente influenciado por el nivel de agua disponible.

- La selección del fertilizante depende de la disponibilidad del producto, de las preferencias del servicio de ventas, logística de almacenamiento y aplicación, y por supuesto del precio por unidad de N.

6. Bibliografía

- Abbate, P.E. y F.H. Andrade. 2006. Los Nutrientes del suelo y la determinación del rendimiento en los cultivos de granos. Pp 43–66. En: HE Echeverría y F García (Ed.), Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires. 525 pp.
- Álvarez, R. y H.S. Steinbach. 2010. Asociación entre el nitrógeno del suelo y el rendimiento de los cultivos. Pp 217–229. En: R Álvarez, G Rubio, CR Álvarez y RS Lavado (Ed.), Fertilidad de Suelos. Caracterización y manejos en la región pampeana. Editorial FAUBA, Buenos Aires. 496 pp.
- Álvarez, R. y H.S. Steinbach. 2010b. Ciclado de nitrógeno en agrosistemas. Pp 231–394. En: R Álvarez, G Rubio, CR Álvarez y RS Lavado (Ed.), Fertilidad de Suelos. Caracterización y manejos en la región pampeana. Editorial FAUBA, Buenos Aires. 496 pp.
- Álvarez, R. y H.S. Steinbach. 2012. Dosificación de la fertilización en maíz. Pp 191–225. En: R Álvarez, P Prystupa, MB Rodríguez y CR Álvarez (Ed.), Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la región pampeana. Editorial FAUBA, Buenos Aires. 623 pp.
- Andrade, F.H.; H.E. Echeverría, N.S. González y S.A. Uhart. 2000. Requerimientos de nutrientes minerales. Pp 207–234. En: F.H. Andrade y V.O. Sadras (Ed.), Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. INTA Balcarce–FCA UNMdP.
- Bongiovanni, M.; D. Martínez Álvarez y O. Barbosa. 2012. Fertilización nitrogenada en sorgo granífero en Los Molles, San Luis. Pp 35–37. En: J.C. Colazo; J.A. Garay y J.H. Veneciano (Ed.), El cultivo de sorgo en San Luis. Información Técnica 183. EEA INTA San Luis.
- Bono, A. y R. Álvarez. 2007. Recomendaciones de fertilización para girasol en las regiones semiáridas y subhúmedas pampeana. Informaciones agronómicas 35. 1-6.
- Bono, A. y R. Álvarez. 2012. Fertilización de maíz en la región semiárida y subhúmeda pampeana. Actas del XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata. (En CD).
- Bono, A. y M. Faggioli. 1994. Eficiencia de la alfalfa (*Medicago sativa* L.) en la recuperación de la fertilidad nitrogenada del suelo en la región semiárida pampeana. Boletín Técnico 45. EEA INTA Anguil. 11 pp.
- Bono, A. y N. Romano. 2008. Nutrición mineral y fertilización. Pp 39–48. En: A. Quiroga y J. Pérez Fernández (Ed.), El cultivo de girasol en la región semiárida pampeana. Publicación técnica 72. EEA INTA Anguil.
- Bono, A.; J. Montoya y F. Babinec. 2000. Fertilización de girasol con nitrógeno, fósforo y azufre en la región semiárida y subhúmeda pampeana. Actas de la jornada: Presente y Futuro del Girasol para la región subhúmeda y semiárida pampeana, Santa Rosa. 4 pp.
- Bono, A.; A. Quiroga y C. Scianca. 2003. Fertilización nitrogenada en la región semiárida pampeana. Pp 66–78. En: Cultivos de cosecha gruesa. Actualización 2003. Boletín de divulgación técnica 77. EEA INTA Anguil.

- Bono, A.; E. de Sá Pereira; N. Romano y J. Montoya. 2007. Efecto de la longitud del barbecho, momento y formas de aplicación de fósforo en girasol. Pp 35–43. En: Aspectos de la evaluación y el manejo de los suelos en la región semiárida pampeana. Nutrición de Cultivos. Publicación técnica 67. EEA Anguil.
- Colazo, J.C.; J.M. de Dios Herrero y C.A. Saenz. 2012. Fertilización nitrogenada de sorgo granífero en un suelo con influencia de napa freática en Villa Mercedes, San Luis. Pp 43–48. En: J.C. Colazo, J.A. Garay y J.H. Veneciano (Ed.), *El cultivo de sorgo en San Luis. Información Técnica 183. EEA INTA San Luis.*
- Colazo, J.C. 2012. Estimación de umbrales de nitrógeno disponible en cultivos de maíz en la región semiárida y subhúmeda pampeana utilizando diferentes enfoques. Trabajo Final del curso de posgrado Modelos de fertilidad de suelos: Diagnóstico y Fertilización. 13 pp.
- Colazo, J.C. 2012b. Nutrición mineral y fertilización. Pp 29–38. En: J.C. Colazo, J.A. Garay y J.H. Veneciano (Ed.), *El cultivo de sorgo en San Luis. Información Técnica 183. EEA INTA San Luis.*
- Colazo, J.C. 2013. Resultados promisorios de la fertilización con cinc en maíces de alta producción en suelos de San Luis. Horizonte Agropecuario 97. CR La Pampa – San Luis. INTA.
- Echeverría, H.E. y H. Sainz Rozas. 2006. Nitrógeno. Pp 69–97. En H.E. Echeverría y F. García (Ed.), *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos.* Editorial INTA, Buenos Aires. 525 pp.
- Echeverría, H.E.; N. Reussi Calvo y F.O. García. 2009. Mejores prácticas de manejo de nitrógeno. Pp 25–34. En: F.O. García y I.A. Ciampitti (Ed.), *Simposio Fertilidad 2009: mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos.* IPNI.
- Ferrari, M. 2009. Las MPM para los cultivos y sistemas de producción. Maíz en la región pampeana central. Pp 286–302. En: F.O. García y I.A. Ciampitti (Ed.), *Simposio Fertilidad 2009: mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos.* IPNI.
- Funes, M. 2004. La alfalfa en San Luis. Disponible en: http://www.produccion-animal.com.ar/alfalfa/08-alfalfa_en_san_luis.pdf, verificado el 10 de junio de 2013.
- García, F.O. y A.A. Correndo. 2013. Cálculo de requerimientos nutricionales. Planilla de cálculo para estimar la absorción y extracción de nutrientes. Disponible en: <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024>, verificado el 10 de junio de 2013.
- Gregoret, M.C.; J. Dardanelli; R. Bongiovanni y M. Díaz Zorita. 2006. Modelo de respuesta sitio-específica del maíz al nitrógeno y agua edáfica en un Haplustol. *Ci. Suelo (Argentina)* 24(2): 147–159.
- Melgar, R. 2012. Guía de fertilizantes, enmiendas y productos nutricionales. Fertilizar AC. 204 pp.
- Melgar, R. 2012b. La importancia de la ubicación del nutriente cuando se aplican fertilizantes líquidos. *Revista Fertilizar* 24: 14–17.
- Quiroga, A.R. M. Saks; D. Funaro y R. Fernández. 2006. Aspectos del manejo del agua y la nutrición nitrogenada de maíz en la región semiárida y subhúmeda pampeana. Pp 44–47. En: Aspectos de la evaluación y el manejo de los suelos en la región semiárida pampeana. Nutrición de Cultivos. Publicación técnica 67. EEA Anguil.
- Racca, R.; D. Collino; J. Dardanelli; D. Basigalup; N. Gonzalez; E. Brenzoni; N. Hein y M. Balzarini. 2001. Contribución de la fijación biológica de nitrógeno a la nutrición nitrogenada de la alfalfa en la región pampeana. Ediciones INTA. 46 pp.
- Romano, N. 2012. Fertilizantes aplicados a la línea de siembra. Pp 136–140. En: AR Quiroga y A Bono (Ed.), *Manual de fertilidad y evaluación de suelos.* Publicación Técnica 89. INTA Anguil. 162 pp.
- Romano, N. y A. Bono. 2012. Pérdidas por volatilización y eficiencia de uso del nitrógeno en maíz tardío. *Actas del XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata.* (En CD).
- Salvagiotti, F.; H. Pedrol; J. Castellarín; J. Capurro; J.C. Felizia; A. Gargicevich; O. Gentili;

- J. Méndez y N. Trentino. 2002. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada en maíz. I. Relación entre la respuesta en rendimiento y la disponibilidad de nitrógeno a la siembra. *Para mejorar la producción* 20: 67–70.
- Salvagiotti, F.; J. Castellarín; F. Ferraguti; D. Dignani y F. Pedrol. 2010. Umbrales de respuesta a la fertilización nitrogenada de maíz y dosis óptimas económicas según potencial de producción. En: *Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Rosario. (En CD).
- Zubillaga, M.M. y M.S. Zubillaga. 2012. Estrategias de aplicación del nitrógeno en agrosistemas pampeanos. Pp 397–416. En: R. Álvarez, P. Prystupa, M.B. Rodríguez y C.R. Álvarez (Ed.), *Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la región pampeana*. 1.º edición. Editorial FAUBA. Buenos Aires. 656 pp.

Fósforo

Juan Cruz Colazo
EEA INTA San Luis

1. Funciones y ciclo

Dada su importancia en la nutrición vegetal, la dinámica del P en los sistemas suelo-planta y la necesidad de respuesta de los cultivos ha sido ampliamente estudiada. El P forma parte de las enzimas, ácidos nucleicos y proteínas y está involucrado en prácticamente todos los procesos de transferencia de energía. Es por ello que su deficiencia se relaciona con este rol (García et al., 2006).

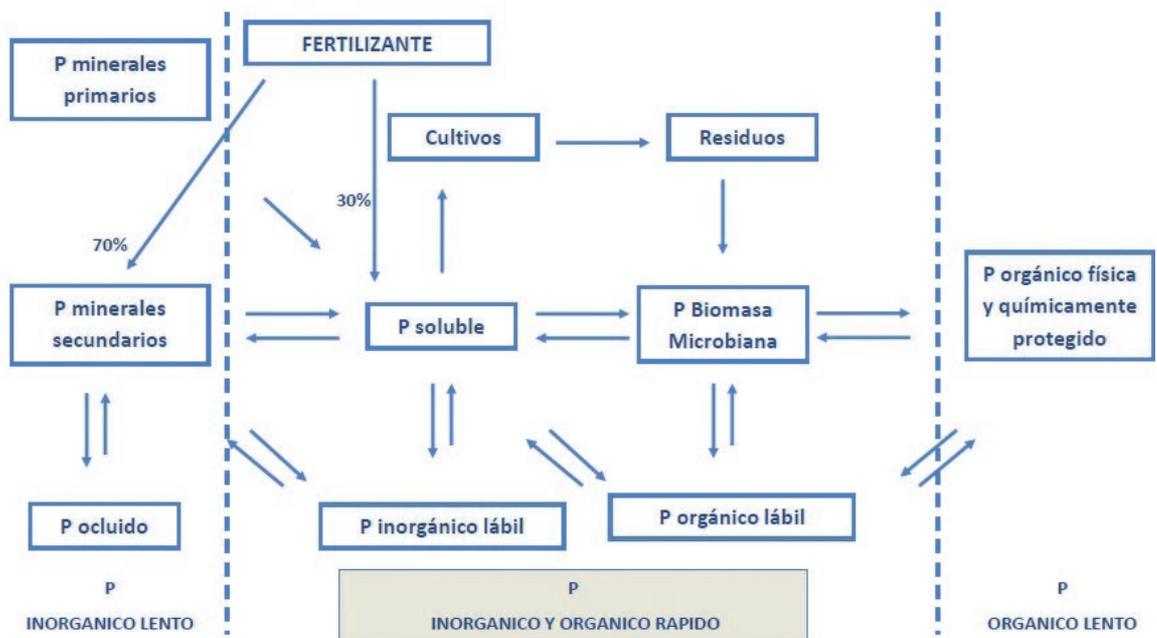


Figura 1. Ciclo de P en el suelo. Adaptado de García et al. (2006).

La Figura 1 muestra un esquema simplificado del ciclo de P en los sistemas agropecuarios. La proporción del P total del suelo en forma orgánica e inorgánica varía en función de las condiciones de suelo y clima. El fósforo inorgánico se encuentra en mayor proporción formando compuestos con Ca, en suelos alcalinos a neutros, mientras que en pH ácidos se asocia con Fe y Al (Prasad y Power, 1997). El P en minerales primarios es aquel contenido en el material original del suelo. Estos pertenecen a las apatitas cuya fórmula general es $\text{Ca}_{10}\text{PO}_4\text{X}$. El P ocluido es aquel que queda involucrado en los minerales secundarios y es físicamente no disponible (Rubio y Álvarez, 2010). El P lábil representa aquellos compuestos adsorbidos que presentan una alta interacción con los componentes del suelo, principalmente aquellos que tienen carga positiva en su superficie. Los mismos se encargan de abastecer al P soluble. El P en solución está formado por fosfatos, que dependiendo del pH predominan en una forma iónica desde H_3PO_4 (pH<6) a PO_4^{3-} (pH>10).

La fracción soluble abastece a la planta a través del equilibrio con las formas lábiles de P. La concentración promedio en la solución es de 0,05 ppm. Por último, el P orgánico es el compartimento menos estudiado y solamente se ha podido aislar una menor cantidad de compuestos, en los que predominan los compuestos de inositol, ácidos nucleicos y fosfolípidos (García et al., 2006).

Estudios realizados en la región semiárida pampeana comprobaron que las formas predominantes de P son las apatitas cálcicas y los fosfatos de calcio; y que las formas de P disponible, orgánico e inorgánico varían en función del manejo, la textura y el tamaño de agregados. En general, los agregados de menor tamaño, de suelos vírgenes y con texturas más finas, presentan mayores concentraciones de todas las fracciones de P. En cuanto a la topografía, los suelos de las porciones bajas del relieve presentan contenidos de P disponible más elevados, mientras que los de pendientes, lomas y planicies muestran contenidos similares y más bajos. En relación con el efecto de la cenizas volcánicas en la sorción de fosfatos, como las presentes en el s de la provincia, se ha encontrado que debido al muy poco grado de meteorización de estas, su capacidad de sorción sería muy baja (Buschiazzo y Hevia, 2009).

2. Requerimiento de los cultivos

Los cultivos difieren en los requerimientos de P así como en la cantidad de P extraído por unidad de producto cosechable (Tabla 1). Las leguminosas y oleaginosas presentan los valores más altos en estos parámetros. Sin embargo, la exportación total por unidad de área (kg P ha^{-1}) depende del rendimiento de cada cultivo en particular (Rubio y Álvarez, 2010). Los cultivos con deficiencias presentan un crecimiento inicial lento, reduciendo el área foliar y afectando en mayor medida el crecimiento. Este mayor efecto sobre el crecimiento foliar que sobre los contenidos de clorofila explica los colores verdes más oscuros observados en plantas deficientes (García et al., 2006).

Tabla 1. Requerimientos de P por unidad de grano, índice de cosecha de P (IC) y exportación de P por unidad de grano de los principales cultivos de cosecha. Valores de humedad: maíz y sorgo (14%), trigo y soja (13,5%) y girasol (12,5%). Tomado de García y Correndo (2013).

Cultivo	Requerimientos (kg Mg^{-1})	IC (%)	Exportación (kg Mg^{-1})
Maíz	4	76	2,6
Sorgo	4,4	82	3,1
Trigo	5	80	3,5
Soja	7	88	5,3
Girasol	11	62	6
Maní	5	50	2,9

3. Formas de absorción

El P se mueve a las raíces a través de los mecanismos de difusión y flujo masal, a medida que el P de la solución del suelo es absorbido por los pelos radiculares. La difusión es el principal de estos dos mecanismos aportando el 80-90% de P necesario, ya que el suministro de P en la solución es bajo (García et al., 2006). La difusión es un proceso que se produce por un gradiente de concentraciones, siendo efectivo a cortas distancias, es por ello que se recomienda en nutrientes de baja solubilidad en la solución del suelo, como el P, que el fertilizante sea colocado en la proximidad de las raíces (Tognetti et al., 2006).

4. Índices de disponibilidad

A diferencia de lo que sucede con nitrógeno, la escasa cantidad de P en la solución no es buena indicadora de la oferta del nutriente para el cultivo. El análisis de suelo permite conocer la capacidad de abastecimiento de P, o el P “disponible”, evaluando principalmente la fracción inorgánica lábil. Los métodos de determinación de P disponible han intentado reproducir la extracción por parte de las raíces, y en tal sentido que se relacione con el rendimiento y la respuesta a la fertilización.

Los métodos más comunes son los que utilizan una solución extractora. En Argentina el método más utilizado es el Bray I modificado que utiliza una solución de fluoruro de amonio (0,03 M) y HCl diluido (0,025 M) como extractante. Este se adecua a suelos ácidos y neutros y permite evaluar el P en solución, el adsorbido y parte del precipitado con aluminio. Estas formas de P son las más importantes en la reposición del P en la solución de los suelos antes mencionados (Ciampitti et al., 2009).

5. Estrategias de fertilización

5.1. Selección de la dosis

Debido a su poca movilidad y a su residualidad existen diferentes criterios al momento de decidir la dosis de fertilización fosfatada (Ciampitti et al., 2009):

a) Suficiencia: se aplica la cantidad para satisfacer necesidades inmediatas, se puede sintetizar en el concepto de “fertilizar al cultivo”. Bajo este enfoque se utilizan dosis de fertilizante basados en los análisis de suelo, ya que se requiere el conocimiento del nivel inicial de P, maximizando el retorno económico (Ferrari, 2009). El método de diagnóstico más empleado se basa en los niveles de P disponible (Bray I). Este método se encuentra calibrado para muestras tomadas en los primeros 20 cm de espesor previo a la siembra del cultivo. De la calibración del método se obtiene la probabilidad de respuesta en función del rango de niveles de P disponible. Esta filosofía se utiliza solamente cuando los niveles de P disponible (Pd) se encuentran por debajo de los niveles de suficiencia.

La Figura 2 muestra la relación entre los rendimientos relativos de soja, maíz, trigo y alfalfa; y P disponible con Bray I. La línea horizontal indica el 90% del rendimiento máximo que puede considerarse como rendimiento máximo económico. Para alcanzar ese rendimiento, los niveles de P bray para rendimientos promedios serían: 10-12, 15-17, 18-20 y 22-25 ppm de P para soja, maíz (sorgo), trigo y alfalfa, respectivamente (García et al., 2006).

Estos niveles no son proporcionales a los requerimientos, sino que se relacionan con otros factores como el tamaño de la semilla, la velocidad de crecimiento, y la temperatura durante las primeras etapas de crecimiento (Ron, 2012).

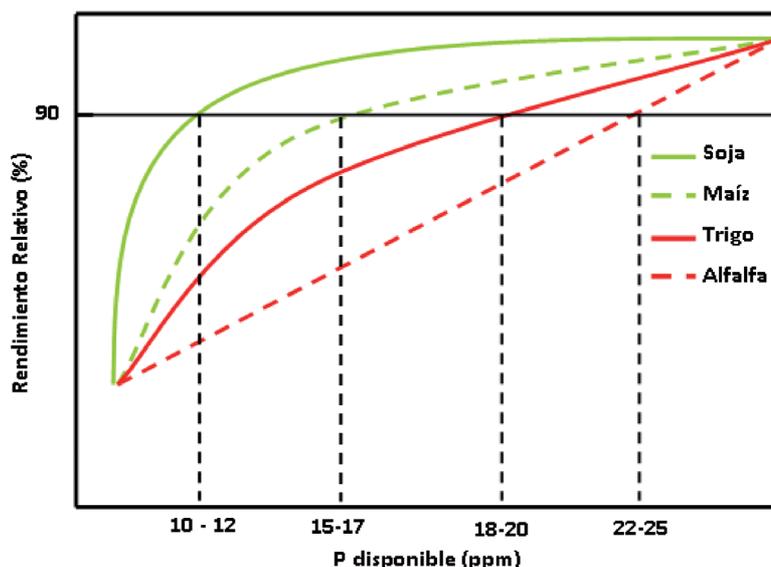


Figura 2. Umbrales de suficiencia P para diferentes cultivos en la región pampeana. Adaptado de García et al. (2006).

En general, ante esta situación se suelen recomendar dosis de entre 10-20 kg de P ha⁻¹, o se estima la dosis necesaria para alcanzar los niveles críticos según la metodología propuesta por Rubio et al. (2004)¹.

b) Reposición: aplicar el P extraído por el cultivo, reponiendo el P al suelo. La dosis a aplicar surge de realizar una estimación de rendimiento y utilizar los valores de la cantidad de P extraída en grano (Tabla 1).

c) Reposición y construcción: aplicar el P extraído por el cultivo, más el P destinado a elevar el nivel del nutriente en el suelo.

Estos dos últimos criterios se pueden resumir en “fertilizar el suelo” (Ferrari, 2009). Simulaciones de resultados económicos utilizando valores medios de precios históricos, rendimientos y eficiencias de uso de P en la región de la pampa ondulada muestran que cuando la elección de la estrategia de aplicación de P es reposición y la fertilización fosforada se realiza con fosfato diamónico, a medida que el suelo es más pobre en P o se incrementa la proporción de cultivos que responden a N en la rotación, aumenta la respuesta esperada y la rentabilidad a la fertilización, siendo umbrales económicos propuestos entre 10–12 ppm (Álvarez, 2012).

¹ Ver Capítulo Interpretación de análisis de suelo

5.2. Tecnologías de fertilización

5.2.1. Selección del fertilizante

La disponibilidad de fuentes de fertilizantes fosfatados en el mercado argentino es amplia y permite la elección de esta según el precio por unidad de P, la eficiencia de cada fuente según la condición ambiental de aplicación, el abastecimiento y la logística de almacenamiento y de aplicación. Se debe considerar que las fuentes fosfatadas disponibles en el mercado presentan una eficiencia de uso similar cuando son aplicadas a dosis equivalentes y métodos comparables de aplicación; la mejor fuente es determinada por factores como disponibilidad del producto, preferencias del servicio de ventas, y por supuesto el precio por unidad de P (García et al. 2009).

En cuanto a propiedades físicas, la solubilidad en agua del fosfato di amónico (FDA), fosfato mono amónico (FMA), superfosfato triple (SFT) y superfosfato simple (SFS) es de 85–95%, siendo necesario al menos 60% de este valor para aplicaciones eficientes, por lo que presentan eficiencias de uso similares. La comparación de fuentes sólidas y líquidas muestra eficiencias similares en suelos ácidos de la región pampeana (Barbagelata, 2012b). Sin embargo, la comparación relativa de estas fuentes en suelos calcáreos aún es escasa en el país. En estos suelos las fuentes líquidas podrían ser más eficientes debido a su mayor movilidad (Lombi et al., 2004).

Tabla 2. Estructura química, grado equivalente (expresado como pentóxido), grado (expresado como fósforo elemento), contenido de otros nutrientes (grado de N, S y Ca) y precio por unidad de fertilizante (tonelada) y fósforo (kg). Datos elaborados con información de Melgar (2012) y Márgenes Agropecuarios (2012). FMA=fosfato mono amónico, FDA=fosfato di amónico, SFT=superfosfato triple y SFS=superfosfato simple.

Nombre	Formula	P ₂ O ₅ (%)	P (%)	Otros nutrientes (%)			Precio ¹	
	Química			N	S	Ca	u\$s/ton	u\$s/kg P
FMA	H ₂ NH ₄ PO ₄	52	23	11	-	-	750	3,3
FDA	H(NH ₄) ₂ PO ₄	46	20	18	-	-	740	3,7
SFT	Ca(H ₂ PO ₄) ₂	46	20	-	-	14	680	3,4
SFS	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ × H ₂ O + CaSO ₄	20	8,7	-	12	20	380	4,4

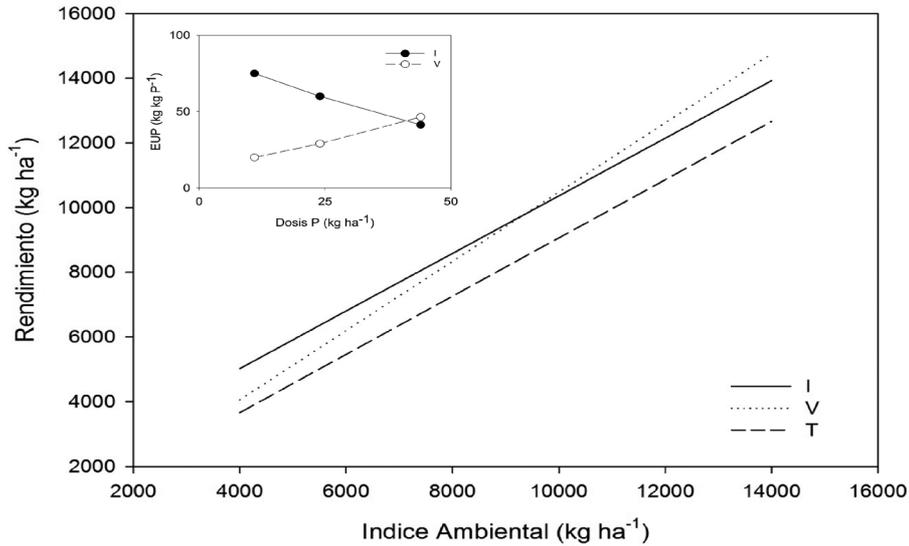


Figura 3. Rendimiento de maíz en función del Índice ambiental (rendimiento medio) para dos formas de aplicación de P: Incorporado (I) y al voleo (V) y un tratamiento testigo (T). EUP=Eficiencia en el uso de fósforo. Adaptado de Barraco et al. (2006).

Existen diferentes variantes al momento de incorporar el fertilizante en bandas en función de sembradoras–fertilizadoras disponibles en el mercado (Figura 4). Una primera opción es aplicar el fertilizante junto con la semilla, mediante un conjunto dosificador propio para cada insumo, que los descarga en un conductor común. Cuando la tolva del fertilizante se encuentra por delante de la de semillas, el insumo es descargado en conductores propios y luego transportado al fondo de un surco abierto por un único surcador, la ubicación del fertilizante produce debajo de la semilla. Si al abrir el surco se produce su desmoronamiento parcial, una capa de este separará la semilla del fertilizante. Las sembradoras que poseen un surcador separado para la aplicación de fertilizante en general lo aplican al costado y debajo, generalmente a una distancia de 5 cm x 5 cm (Álvarez et al., 2012).

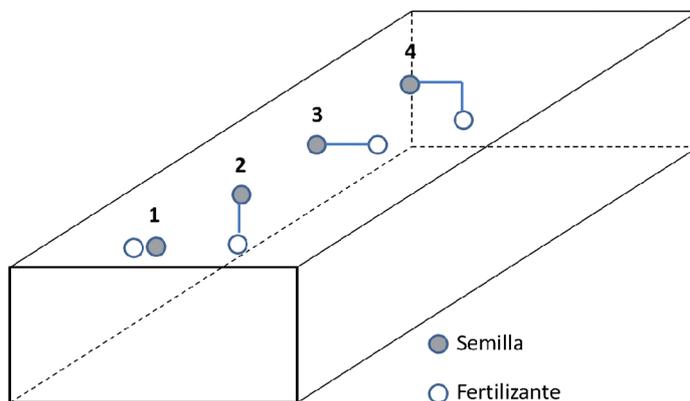


Figura 4. Ubicación del fertilizante. 1: junto a la semilla, 2: debajo de la semilla, 3: al costado de la semilla y 4: al costado y debajo de la semilla.

La aplicación en línea junto con la semilla puede producir efectos fitotóxicos debido a un efecto salino y a la liberación de amoníaco (FDA y FMA). Este efecto depende del cultivo, la capacidad de intercambio catiónica, que depende de la textura, y el estado de humedad al momento de la siembra. La dosis que se puede aplicar disminuye a medida que se incrementa el distanciamiento entre hileras (Romano, 2012).

Como se describió con anterioridad, por su naturaleza poco móvil, si bien es importante procurar no dañar al cultivo debido a la toxicidad, es importante localizar el fertilizante para que se encuentre rápidamente disponible para la planta durante los primeros estadios. Estudios en invernáculo han demostrado que si la distancia al eje de plantas de soja es menor a 12 cm, la velocidad de crecimiento y el desarrollo vegetativo es mayor en plantas de soja durante las primeras etapas de crecimiento (Alonso Vaquer et al., 2012).

6. Situación de los niveles de fósforo disponible en la provincia

Las zonas con deficiencias de este elemento han aumentado como consecuencia de la mayor intensidad de uso del suelo (Gambaudo, 2008). Los estudios sobre los niveles de P en suelos de San Luis² son escasos, sin embargo para la región sudeste se han reportado valores medios superiores a los umbrales críticos de los principales cultivos (70% de las muestras >25 ppm, n=24), atribuibles a un material parental rico en P y a un uso agrícola no tan prolongado (Bongiovanni et al., 2010). El análisis estadístico de los niveles de P disponible en muestras de los primeros 20 cm de sistemas agrícolas y ganaderos de la provincia de San Luis indican una tendencia a la disminución de valores mayores a 25 ppm y un aumento, fundamentalmente, de las clases menores a 15 ppm cuando se comparan los análisis realizados entre 1997–2000 frente a los realizados en 2010–2013 (Figura 5a). Esto implicaría que la probabilidad de encontrar en la provincia situaciones con

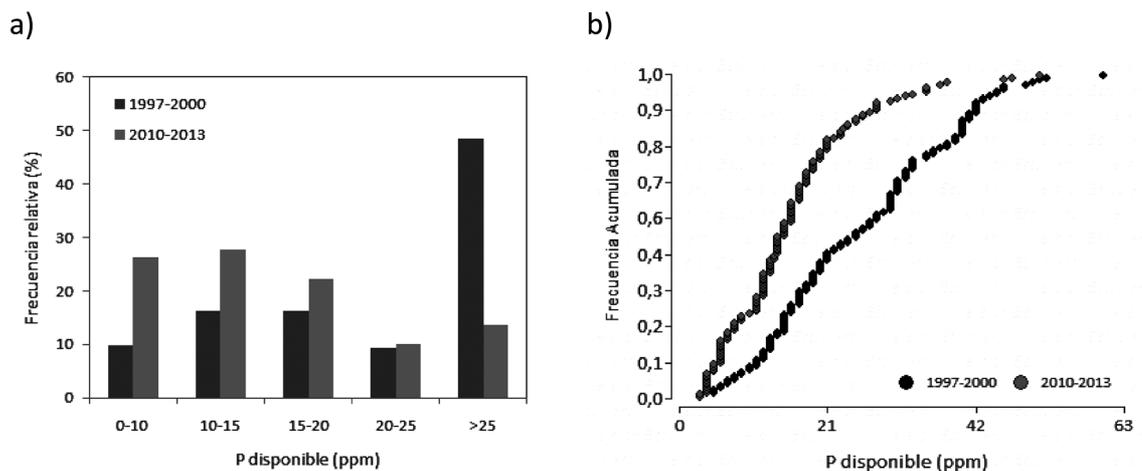


Figura 5. Frecuencia de valores de P disponible en los primeros 20 cm en suelos de San Luis a) relativa y b) acumulada, para los periodos 1997-2000 (n=142) y 2010-2013 (n=140).

² Informes del laboratorio de suelos de la EEA INTA San Luis realizados por Sergio Sayavedra y Marcela Cortés.

bajos valores de P (<10 ppm) aumentó del 10 al 25% en los últimos diez años (Figura 5b). Estos resultados coinciden con las estimaciones de Veneciano y Frigerio (2003) quienes sugieren que en el caso de no realizarse una fertilización adecuada, la extracción de los sistemas extensivos agrícolas y ganaderos en la provincia producirá una inevitable declinación productiva a causa de la exportación de nutrientes.

7. Consideraciones finales

- El P es el nutriente que luego del N limita el crecimiento de los cultivos.
- El P es absorbido por mecanismos de difusión, por lo que es importante la colocación del fertilizante en las cercanías de las raíces.
- Existen índices de disponibilidad que intentan reproducir la extracción de P por parte de las raíces y se relacionen con el rendimiento y la respuesta a la fertilización, siendo el P Bray es el más utilizado.
- Existen diferentes filosofías de aplicación de P: suficiencia, reposición, y reposición y construcción.
- Se prefieren las aplicaciones localizadas a la siembra, aunque en función de ciertas condiciones de sitio, aplicaciones anticipadas presentan similares eficiencias.

8. Bibliografía

- Alonso Vaquer, O.; F. Gutiérrez Boem; G. Rubio y M. Díaz Zorita. 2012. Absorción de fósforo y crecimiento según distancias a sitios de fertilización con fósforo. Actas del XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata. (En CD).
- Álvarez, R. 2012. Estimación del umbral económico para la aplicación de la metodología de reposición y enriquecimiento en fósforo. Actas del XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata. (En CD).
- Álvarez, C.R.; M. Tourn; H. Rimski Korsakov; P. Prystupa. 2012. Máquinas para la aplicación de fertilizantes, enmiendas, abonos e inoculantes. Pp 381-396. En: R. Álvarez, P. Prystupa, M.B. Rodríguez, C.R. Álvarez (Ed.), Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la región pampeana. 1.º edición. Editorial FAUBA. Buenos Aires. 656 pp.
- Barbagelata, P. 2012. Manejo del fósforo en suelos de regiones templadas. Actas del XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata. (En CD).
- Barbagelata, P. 2012b. Aplicación de fertilizantes fosfatados en soja. Campaña 2011-2012. Informe técnico. Disponible en: <http://www.dualfos.com.ar/img/entradas/Ensayo%20INTA%20PARANA%202011-12.pdf>.
- Barraco, M.; M. Díaz Zorita y C. Álvarez. 2006. Aplicaciones incorporadas y en superficie de fósforo en cultivos de maíz. Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta. (En CD).
- Bongiovanni, M.D.; R. Marzari y M. Ron. 2010. Fósforo disponible en suelos agrícolas del sur de Córdoba y sudeste de San Luis. En: Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario. (En CD).
- Buschiazzo, D.E. y G.G. Hevia. 2009. Formas y dinámica de fósforo en suelos de la región semiárida pampeana central. Actas de las I Jornadas Nacionales de Cultivos de cobertura. (En CD).

- Ciampitti, I.A.; G. Rubio; L.I. Picote y F.O. García. 2009. El fósforo en la agricultura: Mejores prácticas de Manejo (MPM). Pp 35–51. En: FO García y IA Ciampitti (Ed.), Simposio Fertilidad 2009: mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos. IPNI.
- Ferrari, M. 2009. Las MPM para los cultivos y sistemas de producción. Maíz en la región pampeana central. Pp 286–302. En: FO García y IA Ciampitti (Ed.), Simposio Fertilidad 2009: mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos. IPNI.
- Gambaudo, S. 2008. Fertilización del sorgo granífero. Pp 237–244. En: R. Melgar y M. Díaz Zorita (Ed.), Fertilización de cultivos y pasturas. 2.da Edición ampliada y actualizada. Editorial Hemisferio Sur y INTA.
- García, F.O.; I. Ciampitti; G. Rubio y L. Picone. 2009. La fertilización fosfatada en la Argentina: Actualidad, manejo y perspectivas. Actas de las I Jornadas Nacionales de Cultivos de cobertura. (En CD).
- García, F.O.; L.I. Picone y A. Berardo. 2006. Fósforo. Pp 99–121. En H.E. Echeverría y F. García (Ed.), Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires. 525 pp.
- García, F.O. y A.A. Correndo. 2013. Cálculo de requerimientos nutricionales. Planilla de cálculo para estimar la absorción y extracción de nutrientes. Disponible en: <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024>, verificado el 10 de junio de 2013.
- Lombi, E.; M.H. McLaughlin; C. Johnston; D.R. Armstrong y R.E. Holloway. 2004. Mobility, solubility and lability of fluid and granular forms of P fertilizer in calcareous and non-calcareous soils under laboratory conditions. *Plant & Soil* 269: 25–34.
- Prasad, R. y J.F. Power. 1997. *Soil Fertility management for sustainable agriculture*. CRC Press, Boca Raton. 346 pp.
- Prystupa, P. C.R. Álvarez y H. Rimski Korsakov. 2007. Ubicación del fertilizante. Pp 55-68. En P Prystupa (Ed.), *Tecnología de la fertilización de cultivos extensivos en la región pampeana*. Editorial FAUBA. 227 pp.
- Romano, N. 2012. Fertilizantes aplicados a la línea de siembra. Pp 136–140. En: A.R. Quiroga y A. Bono (Ed.), *Manual de fertilidad y evaluación de suelos*. Publicación Técnica 89. INTA Anguil. 162 pp.
- Ron, M. 2012. Gestión de fósforo en sistemas agropecuarios del sudoeste bonaerense. *Agro UNS* 17: 9–12.
- Rubio, G. y C.R. Álvarez. 2010. Fósforo: Dinámica y evaluación en agroecosistemas. Pp 311–336. En: R Álvarez, G Rubio, CR Álvarez y RS Lavado (Ed.), *Fertilidad de Suelos. Caracterización y manejos en la región pampeana*. Editorial FAUBA, Buenos Aires. 496 pp.
- Rubio, G.; F. Gutiérrez Boem y M. Cabello. 2004. ¿Cuánto fósforo hay que aplicar para alcanzar el umbral crítico de fósforo disponible en el suelo? I. Cálculo a partir de propiedades básicas de suelo. *Informaciones agronómicas* 23: 5–8.
- Tognetti, J.A.; L.A.N. Aguirrezábal y S.G. Assuero. 2006. Funciones de los nutrientes en el crecimiento vegetal. Pp 19–42. En H.E. Echeverría y F. García (Ed.), *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires. 525 pp.
- Veneciano, J.H. y K.L. Frigerio. 2003. Exportación de macronutrientes en sistemas extensivos en San Luis. *Informaciones agronómicas* 17: 17-22.

Azufre

Juan Cruz Colazo
EEA INTA San Luis

1. Funciones y ciclo

El azufre (S) forma parte de los aminoácidos metionina y cisteína. Generalmente, el 90% del S en planta se encuentra en dichos aminoácidos. El S está íntimamente relacionado con el N en los procesos de síntesis de proteínas y enzimas. El follaje de plantas saludables contiene generalmente entre 0,1-0,5% de S, o aproximadamente un décimo del contenido de N (Echeverría, 2006).

En forma análoga al N, el S está sujeto a oxidación y reducción microbiana; puede entrar y salir del suelo en forma gaseosa y está sujeto a algún grado de lavado bajo la forma aniónica. Sin embargo, pensar en la dinámica de S en el sistema suelo-planta como si fuera la de N representa una sobre-simplificación, la cual puede llevar a cometer errores en el manejo de la nutrición azufrada de los cultivos (Reussi Calvo y Echeverría, 2009).

En las regiones húmedas la mayor parte del S se encuentra formando parte de la materia orgánica (90-98%), por lo tanto distintos contenidos de S en estos suelos suelen estar directamente relacionados con diferencias en el contenido de materia orgánica (Gutiérrez Boem, 2010). En regiones áridas y semiáridas, menos materia orgánica está presente en el horizonte superficial; sin embargo es frecuente encontrar yeso en los horizontes subsuperficiales, el cual abastece de S inorgánico a los vegetales. Por ende, la proporción de S orgánico, no es elevada en suelos de regiones áridas o semiáridas como lo es en regiones húmedas (Echeverría, 2006).

En suelos agrícolas bien aireados, el S en la solución se encuentra en el estado de máxima oxidación, como sulfatos (SO_4^{2-}). Estos sulfatos se encuentran inmediatamente disponible para la plantas. En regiones templadas húmedas la cantidad en el suelo es de aproximadamente 25 mg L^{-1} , siendo mayor en suelos salinos y en regiones más áridas. Las lluvias y la deposición de polvo atmosférico pueden constituir vías importantes de ingreso de S en el suelo en algunas regiones. El S ingresa a la atmósfera desde diversas fuentes (polvo, volcanes, emisiones industriales) y generalmente buena parte de S es depositado en la cercanía de las mismas. Asociado a las precipitaciones, en la ciudad de San Luis se han registrado valores de $1,6 \text{ kg de S ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Gutiérrez Boem, 2010).

2. Requerimiento de los cultivos

En general, las gramíneas requieren menos S que las leguminosas. Los síntomas de deficiencia de S son similares a aquellos asociados a N. Sin embargo, a diferencia de este, el S es relativamente inmóvil en la planta, y entonces la clorosis se desarrolla primero en las hojas jóvenes. La deficiencia de S en leguminosas disminuye la concentración de los aminoácidos metionina y cistina, lo que reduce el contenido de proteína y aumenta la proporción de N no proteico (Echeverría, 2006).

Tabla 1. Requerimientos de S por unidad de grano, índice de cosecha de S (IC) y exportación de S por unidad de grano de los principales cultivos de cosecha. Valores de humedad: maíz y sorgo (14%), trigo y soja (13,5%) y girasol (12,5%). Tomado de García y Correndo (2013).

Cultivo	Requerimientos (kg S Mg ⁻¹)	IC (%)	Exportación (kg S Mg ⁻¹)
Maíz	3,4	35	1,2
Sorgo	3,7	57	1,8
Trigo	5	34	1,5
Soja	4,5	72	2,8
Girasol	5	45	2
Maní	4	75	2,6

3. Formas de absorción

El S se absorbe principalmente como sulfato (SO₄²⁻) por flujo masal, es por ello que a mayores concentraciones de agua en el suelo, concentración de sulfatos en la solución y tasa transpiratoria de la planta, mayor será la absorción de S (Abbate y Andrade, 2006).

4. Índices de disponibilidad

Los índices de disponibilidad basados en el análisis de muestras de suelo se basan en la extracción de S como sulfato con distinto grado de retención y el S liberado durante incubaciones o crecimiento microbiano. Sin embargo, la utilización del análisis de suelo para evaluar el estatus azufrado presenta dos tipos de inconvenientes, el primero metodológico, relacionado con la poca precisión de métodos disponibles (turbidimetría) y equipamiento caro; y el segundo relacionado con la profundidad de muestreo.

Análisis de perfiles en la región pampeana han encontrado que el 60% del S se encuentra por debajo de los 60 cm (Russi et al., 2012). En algunos suelos se puede acumular sulfato en profundidad por lavado desde horizontes superficiales, desde una capa freática o desde un horizonte subsuperficial. Por lo tanto, el aporte de horizontes subsuperficiales puede cubrir los requerimientos de los cultivos, en suelos considerados deficientes en base al análisis de horizontes superficiales. A pesar de algunos pocos resultados auspiciosos, no se ha logrado desarrollar un método de análisis de S en muestras de suelo lo suficientemente económico, rápido, robusto y confiable, a fin de identificar sitios con deficiencia de S que permita caracterizar la disponibilidad de S para los cultivos (Echeverría, 2006).

5. Criterios de fertilización

El contenido de SO₄²⁻ en suelo no constituye un método de diagnóstico adecuado en maíz y se debe considerar preliminar en soja y trigo (Echeverría et al., 2011). Por lo tanto valores críticos reportados en la bibliografía internacional y en algunos pocos ensayos de-

ben tomarse como indicativos. En regiones semiáridas, sitios con menos de 10 ppm de $S-SO_4^{2-}$ (0–20 cm) y valores de MO/(limo+arcilla) <5 podrían tener mayor probabilidad de respuesta a la fertilización (Romano, 2012).

En maíz, la integración de la información de redes de ensayos indica una respuesta media a la aplicación de este nutriente en regiones húmedas (Álvarez y Steinbach, 2012), no así en regiones semiáridas (Bono y Álvarez, 2012). En la mayoría de los ensayos donde se han comparado varias dosis se ha encontrado que no es necesario agregar más de 10 kg de S ha⁻¹ en soja, maíz y sorgo granífero (Gutiérrez Boem, 2012; Ferrari, 2009; Fontanetto et al., 2010).

Por esta razón, en lugar de tratar de determinar la existencia de deficiencias de S generalmente pequeñas, por medio de análisis de suelo, se recomienda aplicar una pequeña cantidad de S (10 kg ha⁻¹), para cultivos creciendo en ambientes pre disponentes a la deficiencia de S (Echeverría y Sainz Rozas, 2006). En zonas como el sur de la provincia de Santa Fe y norte de Buenos Aires se han determinado deficiencias y respuestas al agregados de S en los principales cultivos de cosecha (soja, trigo, maíz), en lotes con prolongada historia agrícola, con bajos contenidos de materia orgánica, y preferentemente bajo siembra directa (Echeverría, 2006). También se proponen como pre disponentes aquellos ambientes con altos rendimientos sostenidos, que no sean limitantes en N y P (Díaz Zorita y García, 2008; Ferrari, 2009).

En nuestros ambientes, en maíz y sorgo se sugiere la aplicación postergada de S (≈ 10 kg de S ha⁻¹) en conjunto con la aplicación de N (mezclas nitro–azufradas) en las siguientes situaciones: niveles de P no limitantes (fósforo disponible en el suelo (0-20 cm) >15 ppm o fertilización a la siembra, generalmente con FDA-FMA), agua disponible en estados de cuatro-seis hojas/riego, suelos de textura arenosa–arenosa franca con contenidos de materia orgánica menores al 1%. En el caso de soja, aplicaciones a la siembra son recomendable en las situaciones citadas con anterioridad, con la particularidad de que en condiciones de mucha deficiencia de P (Pd < 10 ppm) se aconsejaría la aplicaciones en fuentes independientes del P (sulfato de amonio o sulfato de calcio), mientras que en niveles intermedios (Pd ≈ 12 ppm) una alternativa sería la aplicación conjunta con P usando superfosfato simple (SFS).

6. Tecnología de fertilización

Los fertilizantes azufrados se pueden clasificar según la solubilidad en agua. Las fuentes solubles presentan S en forma de sulfato, que es de inmediata disponibilidad para las plantas. Dentro de las insolubles en agua, el azufre elemental es el más importante, cuya reactividad depende del tamaño de las partículas y de condiciones ambientales (Prystupa et al., 2012).

Los principales fertilizantes azufrados sólidos utilizados en la Argentina son el sulfato de amonio (SA), yeso y SPS (Tabla 2). Todas estas fuentes azufradas son solubles en agua y contienen S en forma biodisponible. En cuanto a los fertilizantes líquidos el tiosulfato de amonio (TSA) constituye una fuente importante, que se utiliza en mezclas con UAN para obtener formulaciones nitro azufradas con diferentes grados (Rodríguez y Torres Duggan, 2012).

En términos generales no se han encontrado diferencias entre las fuentes más utilizadas (yeso, SA, SPS) en diferentes cultivos. A fines agronómicos se puede considerar el TSA con la misma eficiencia agronómica que fuentes sólidas (Prystupa et al., 2012). Si bien, la información es escasa no sería esperable grandes diferencias entre momentos de fertilización, ni fuente como se mencionó con anterioridad. La combinación fuente–momento–forma a utilizar depende principalmente de aspectos logísticos (Prystupa et al., 2012). En el caso de cereales de verano se ha incrementado la fertilización de S mediante el uso de mezclas nitro–azufradas en estados de cuatro a seis hojas.

Tabla 2. Estructura química, grado (expresado como azufre elemento), contenido de otros nutrientes (grado de N, P y Ca) y precio por unidad de fertilizante (tonelada) y azufre (kg). Datos elaborados con información de Melgar (2012), Márgenes Agropecuarios (2012). SA=sulfato de amonio, TSA=tiosulfato de amonio, SPS=superfosfato simple, MAPS=fosfato mono amónico azufrado.

Nombre	Formula Química	S (%)	Otros nutrientes (%)			Precio ¹	
			N	P	Ca	u\$\$/ton	u\$\$/kg S
SA	(NH ₄) ₂ SO ₄	24	21	-	-	480	2
TSA	(NH ₄) ₂ S ₂ O ₃	26	12	-	-		
UAN 28	UAN + TSA	5,2	28	-	-	445	8,6
SPS	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ x H ₂ O + CaSO ₄	12	-	8,7	20	380	3,2
Yeso	CaSO ₄ .2H ₂ O	18	-	-	22	300	1,7
MAPS	NH ₄ H ₂ PO ₄ .NH ₄ .S.SO ₄	12	12	15		670	5,6

1. Valores al 1/10/2012. Revista Márgenes Agropecuarios 328. Los precios no incluyen IVA.

6. Consideraciones finales

- En la región pampeana se ha comenzado a observar respuesta a la fertilización con S.
- El análisis de suelo aún no es una herramienta robusta.
- Bajo determinadas condiciones de sitio se recomienda fertilizar con dosis no mayores a 10–15 kg de S ha⁻¹.
- La combinación de fuente–momento y forma de aplicación depende fundamentalmente de aspectos logísticos.

7. Bibliografía

- Abbate, P.E. y F.H. Andrade. 2006. Los Nutrientes del suelo y la determinación del rendimiento en los cultivos de granos. Pp 43–66. En H.E. Echeverría y F. García (Ed.), Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires. 525 pp.
- Álvarez, R. y H.S. Steinbach. 2012. Dosificación de la fertilización en maíz. Pp 191–225. En: R. Álvarez R, P. Prystupa, M.B. Rodríguez y C.R. Álvarez (Ed.), Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la región pampeana. Editorial FAU-BA, Buenos Aires. 623 pp.
- Bono, A. y R. Álvarez. 2012. Fertilización de maíz en la región semiárida y subhúmeda pampeana. Actas del XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata. (En CD).

- Díaz Zorita, M. y F.O. García. 2008. Fertilización del maíz. Pp 211–236. En: R. Melgar y M. Díaz Zorita (Ed.), Fertilización de cultivos y pasturas. 2.da Edición ampliada y actualizada. Editorial Hemisferio Sur y INTA.
- Echeverría, H.E. 2006. Azufre. Pp 139–160. En H.E. Echeverría y F.O. García (Ed.), Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires. 525 pp.
- Echeverría, H.E.; N. Reussi Calvo; A. Pagani y L. Fernández. 2011. Métodos de diagnóstico de deficiencias de azufre en los cultivos de trigo, soja de segunda y maíz. Pp 98-107. En: F.O. García y A.A. Correndo (Ed.), Simposio Fertilidad 2011. La nutrición de cultivos integrada al sistema productivo. IPNI.
- Ferrari, M. 2009. Las MPM para los cultivos y sistemas de producción. Maíz en la región pampeana central. Pp 286–302. En: F.O. García y I.A. Ciampitti (Ed.), Simposio Fertilidad 2009: mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos. IPNI.
- Ferraris, G. 2008. Fertilización de la soja. Pp 261–278. En: R Melgar y M Díaz Zorita (Ed.), Fertilización de cultivos y pasturas. 2.da Edición ampliada y actualizada. Editorial Hemisferio Sur y INTA.
- Fontanetto, H.; O. Keller; L. Belloti; C. Negro y D. Gialevra. 2010. Efecto de diferentes combinaciones de nitrógeno y azufre sobre el cultivo de sorgo granífero (campana 2008/09). *Informaciones Agronómicas* 46: 21-23.
- Gutiérrez Boem, F. 2010. Regulación y diagnóstico de la disponibilidad de azufre. Pp 337–352. En: R. Álvarez, G. Rubio, C.R. Álvarez y R.S. Lavado (Ed.), Fertilidad de Suelos. Caracterización y manejos en la región pampeana. Editorial FAUBA, Buenos Aires. 496 pp.
- Gutiérrez Boem, F. 2012. Fertilización del cultivo de soja. Pp 227–250. En: R. Álvarez, P. Prystupa, M.B. Rodríguez y C.R. Álvarez (Ed.), Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la región pampeana. Editorial FAUBA, Buenos Aires. 623 pp.
- Prystupa, P.; M. Torres Duggan y G.A. Ferraris. 2012. Fuentes y formas de aplicación de azufre y micronutrientes en la Región Pampeana. Pp 427–449. En: R. Álvarez, P. Prystupa, M.B. Rodríguez y C.R. Álvarez (Ed.), Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la región pampeana. Editorial FAUBA, Buenos Aires. 623 pp.
- Rodríguez, M.B. y M. Torres Duggan. 2012. Caracterización de los fertilizantes y su calidad agronómica. Pp 327–366. En: R. Álvarez, P. Prystupa, M.B. Rodríguez y C.R. Álvarez (Ed.), Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la región pampeana. Editorial FAUBA, Buenos Aires. 623 pp.
- Romano, N. 2012. Azufre. Pp 115–118. En: A. Quiroga y A. Bono (Ed.), Manual de fertilidad y evaluación de suelos. Publicación Técnica 89. INTA Anguil. 162 pp.
- Russi, D.; F. Gutiérrez Boem; P. Prystupa; G. Rubio y S.R. Acierne. 2012. Distribución vertical de sulfatos en suelos de pampa ondulada y pampa interior. En Actas del XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata (En CD).

1. Importancia de los micronutrientes

Los micronutrientes son aquellos elementos esenciales que presentan concentraciones extremadamente bajas en suelos y plantas. La deficiencia de micronutrientes en los cultivos es cada vez más frecuente a nivel mundial. En la actualidad existe un creciente interés por incrementar la concentración de estos en los órganos de cosecha, por ejemplo granos de cereales. Dicho interés no solo responde al objetivo de incrementar los rendimientos, sino también a subsanar deficiencias nutricionales de la población.

En la región pampeana se han comenzado a observar deficiencias de micronutrientes y respuestas a la fertilización, particularmente de B y Zn, en ciertos cultivos extensivos como girasol y maíz. La importancia de los micronutrientes aumenta a medida que se incrementa la intensificación de los sistemas de cultivo, como por ejemplo planteos de alta producción no limitados por agua y macronutrientes (Ferraris, 2011).

2. Principales factores que regulan la disponibilidad de micronutrientes

2.1. pH

El pH se relaciona estrechamente con la disponibilidad de los micronutrientes, ya que determina su concentración en la solución del suelo, las especies iónicas presentes y la movilidad de estas (Figura 1). En general, los micronutrientes catiónicos (Fe, Cu, Mn y Zn) disminuyen su disponibilidad, mientras que por el otro lado, la disponibilidad de Mo (forma aniónica) aumenta en pH neutros–alcalinos. La disponibilidad de B, es ligeramente mayor en pH neutros, aunque su disponibilidad no es mayormente afectada por el pH porque todas sus formas son solubles (Ferraris, 2011).

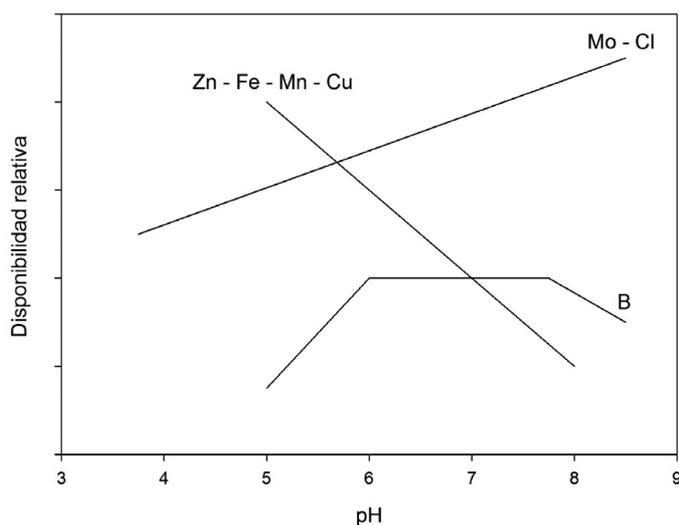


Figura 1. Disponibilidad relativa de micronutrientes en función del pH del suelo. Adaptado de Malavolta (1997) citado por Ferraris (2011).

2.2. Materia orgánica

La materia orgánica (MO) regula la disponibilidad de micronutrientes mediante procesos de inmovilización por compuestos de alto peso molecular y mineralización de ácidos orgánicos de bajo peso molecular (Tisdale et al., 1993). El B es el micro nutriente donde la fracción orgánica adquiere mayor importancia, ya que puede llegar a constituir el 95% de su reserva. En el caso de Zn, se ha encontrado una estrecha asociación con el nivel de MO (Sainz Rozas, 2012), considerándose deficientes los valores de Zn disponible en suelos arenosos a franco arenosos con bajo contenido de MO (Buffa et al., 2011). Además se ha comprobado que seleccionando suelos con bajos contenidos de MO, el nivel de Zn en el suelo aumenta su robustez como indicador de respuesta (Ferraris y Couretot, 2013).

2.3. Condiciones ambientales

Las deficiencias de Zn son más frecuentes con temperaturas frías, ya que a una mayor temperatura, la disponibilidad de Zn aumenta debido al incremento de su solubilidad y difusión (Tisdale et al., 1993). Ensayos realizados en la región pampeana sugieren que la respuesta del B sería relativamente mayor en condiciones de déficit hídrico tanto en soja como en girasol (Díaz–Zorita, 2002; Ferraris, 2013). Esto se debería a que en estas condiciones existiría una mayor dificultad de la planta para abastecerse de este elemento, ya que el mismo se moviliza mediante flujo masal.

2.4. Interacción con otros nutrientes

Una alta disponibilidad de P puede inducir deficiencias de Zn. El mecanismo es aún controvertido, existen autores que afirman que disminuiría su solubilidad por la formación de compuestos fosfatados (Torri et al., 2010), mientras que otros sostienen que existe un efecto fisiológico en la capacidad de la planta para regular la absorción de P, existiendo un exceso de este elemento en la planta que induce la deficiencia de Zn (Tisdale et al., 1993).

3. Índices de disponibilidad

Estudios recientes en la región pampeana reportan valores de B disponible en suelos cultivados del orden de 1,4–2 mg kg⁻¹ y de Zn disponible de 0,8–1,1 mg kg⁻¹ (Sainz Rozas, 2012b). En la provincia de San Luis en un suelo cultivado de textura arenosa franca y menos de 1% de MO se reportaron valores de Zn disponible de 0,87 mg kg⁻¹ (Colazo, 2013). La bibliografía considera niveles bajos de Zn aquellos por debajo de 1 mg kg⁻¹, mientras que en B este umbral es de 0,3-0,5 mg kg⁻¹ (Torri et al., 2005). Con respecto a Zn, se ha relacionado la respuesta a la fertilización con los niveles de Zn disponibles cuando se utilizan sitios con bajos niveles de MO (Ferraris y Couretot, 2013). Con relación al B, todavía no ha sido posible elaborar un método de diagnóstico que permita inferir la probabilidad de respuesta al agregado de este (Bono y Romano, 2008).

4. Estudio de micronutrientes en los principales cultivos

4.1. Cinc (Zn)

El cinc (Zn) participa en el sistema enzimático y es precursor del aminoácido triptófano y

del ácido indol acético, una hormona de crecimiento. La demanda de Zn depende de la especie vegetal considerada, del cultivar y de los rendimientos obtenidos. La deficiencia de Zn produce un crecimiento reducido de las plantas, con entrenudos cortos y las hojas suelen presentar una clorosis intervenal, o sea una coloración anormal, en general de color amarilla y siguiendo las nervaduras (Ferraris, 2011).

En la región pampeana se han observado deficiencias de Zn en ciertos cultivos extensivos, en especial en maíz. Ensayos realizados en el sur de Córdoba, norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe han encontrado respuestas a la fertilización del orden de 750–900 kg ha⁻¹ (Espósito et al., 2011; Melgar et al., 2001). Estas deficiencias generalmente se manifiestan en planteos de alta producción, donde se maximizan los rendimientos a través de un elevado nivel tecnológico en determinadas condiciones edáficas: pH básicos, bajos contenidos de materia orgánica, altos niveles de fósforo; y climáticas: bajas temperaturas. En cuanto a experiencias locales, durante la campaña 2011-12 se realizó un ensayo para evaluar el efecto combinado de distintas estrategias de fertilización nitrogenada y la aplicación de Zn en maíces bajo riego, en las proximidades de la localidad de Fraga. La respuesta al agregado de Zn fue de 950 kg ha⁻¹ (Figura 2). Es probable que estos resultados se deban a los bajos valores de Zn disponibles (<1 mg kg⁻¹) producto de la combinación de condiciones que predisponen su deficiencia: suelos arenosos a franco arenosos con escaso contenido de materia orgánica, de pH elevado (>7,5), presencia de carbonatos y altos valores de fósforo disponible (Colazo, 2013).

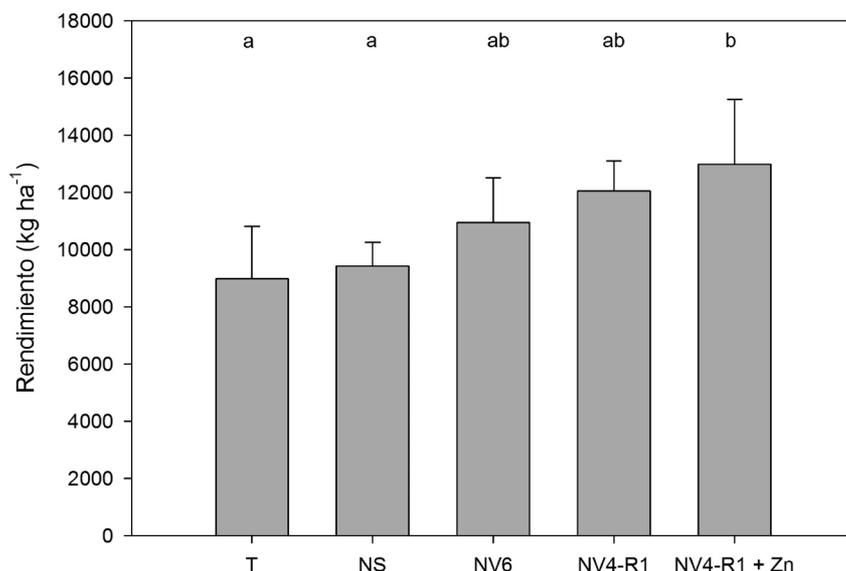


Figura 2. Rendimiento en grano (H°=14%) de maíz para diferentes tratamientos de fertilización: T=testigo, NS=fertilización con nitrógeno a la siembra, NV6=fertilización con nitrógeno en estado V6, NV4-R1=fertilización con nitrógeno en cuatro dosis fraccionada entre V4-R1 y NV4-R1+Zn=fertilización con nitrógeno en cuatro dosis fraccionada entre V4-R1 + aplicación de Zn en V6. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (Colazo, 2013).

4.2. Boro (B).

El B actúa en el proceso de división celular, determina la tasa de crecimiento de la porción terminal de la planta, el metabolismo de azúcares, la formación del tubo polínico, desarrollo de semillas y frutos, la germinación y participa en procesos de regulación hormonal

(Fancelli y Vázquez, 2006; Torri et al., 2006; 2010).

En el E de la Pampa, las respuestas al agregado de B en girasol han sido aleatorias entre sitios y años, con respuestas de 200 kg ha⁻¹ en algunos sitios (Bono y Romano, 2008). En otras regiones, como el SE de Córdoba y el O de Buenos Aires se han observado respuesta a la fertilización (Balboa et al., 2010; Díaz-Zorita, 2002). En soja, se han reportado incrementos del 7-8% en suelos del N de Buenos Aires y S de Santa Fe (Ferraris y Couretot, 2011; Salvagiotti, 2013).

5. Tecnologías de la fertilización

La concentración, forma química y solubilidad de los micronutrientes varía considerablemente entre fuentes dificultando su comparación. Por este motivo, la concentración de un micronutriente en una fuente y su costo por unidad no es el parámetro más importante para realizar comparaciones, como suele hacerse en el caso de los macronutrientes.

Por sus pequeñas dosis, los micronutrientes pueden ser aplicados sobre semilla, vía foliar o al suelo (Ferraris, 2013). En el caso de tratamientos de semilla se suelen utilizar óxidos de alta concentración, siendo las dosis reducidas. En aplicaciones foliares, los quelatos y complejos orgánicos son los más utilizados, ya que tienen carga neutra y son apropiados para mezclas en el tanque con otros agroquímicos. Para los tratamientos aplicados al suelo las dosis suelen ser mayores comparadas a los demás tipos de aplicaciones, no siendo recomendable más de 1,5-2 kg de Zn ha⁻¹ (Michiels y Ruffo, 2012). La respuesta a la fertilización con diferentes formas de aplicación de Zn en maíz es relativamente similar, sin embargo la eficiencia en el uso de Zn es mayor en aplicaciones en semilla, debido a las menores dosis utilizadas (0,1–0,2 kg Zn ha⁻¹) comparada con aplicaciones foliares (0,3 – 0,5 kg Zn ha⁻¹) y al suelo (>0,4 kg Zn ha⁻¹), siendo las respuestas absolutas algo más altas con las aplicaciones al suelo (Ferraris, 2011).

La elección de la fuente suele pasar por una decisión logística. Las aplicaciones foliares permiten una mayor uniformidad en la distribución y la posibilidad de aplicarlas junto a herbicidas e insecticidas, siendo el carácter no salino de la fuente y la calidad de la aplicación los aspectos más relevantes (Ferraris y Couretot, 2013). En cuanto a las fuentes aplicadas al suelo, estas poseen una menor eficiencia, pero en la actualidad existen fuentes que permiten integrar su aplicación en soluciones nitro-azufradas, aumentando su practicidad.

En boro, las aplicaciones foliares son las más utilizadas, con dosis entre los 0,3–2 kg B ha⁻¹, siendo las fuentes más utilizadas el ácido bórico y los boratos de sodio, en momentos que van desde V2 hasta R1 en girasol (Bono y Romano, 2008). En soja, la ventana de aplicación es V2-R3, sin diferencia entre momentos con dosis de 0,05–0,24 kg de B ha⁻¹ (Ferraris y Couretot, 2011; Salvagiotti, 2013).

6. Consideraciones finales

- La importancia de los micronutrientes se incrementa en planteos donde el agua y los macronutrientes no son limitantes.

- El Zn y el B son dos de los micronutrientes que muestran respuesta en maíz, soja y girasol. La probabilidad de respuesta es mayor en suelos con altos valores de pH y bajos de materia orgánica.

7. Bibliografía

- Balboa, G.R.; G.P. Espósito; C. Castillo y R. Balboa. 2010. Estrategias de fertilización con boro en girasol. Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (en CD). Rosario.
- Bono, A. y N. Romano. 2008. Nutrición mineral y fertilización. Pp 39 – 48. En: A Quiroga y J Pérez Fernández (Ed.), El cultivo de girasol en la región semiárida pampeana. Publicación técnica 72. EEA INTA Anguil.
- Colazo, J.C. 2013. Resultados promisorios de la fertilización con cinc en maíces de alta producción en suelos de San Luis. Horizonte Agropecuario 97. CR La Pampa–San Luis. INTA.
- Díaz–Zorita, M. 2002. Nutrición mineral y fertilización. Pp 76–96. En: M. Díaz–Zorita y O. Duarte (Ed.), Manual Práctico del cultivo de Girasol. Editorial Hemisferio Sur.
- Espósito, G.; G. Balboa; C. Castillo y R. Balboa. 2011. Disponibilidad de zinc y respuesta a la fertilización del maíz en el sur de Córdoba. Pp 172–173. En: FO García y A Correndo (Ed.), Simposio Fertilidad 2011. La nutrición de cultivos integrada al sistema productivo. IPNI.
- Fancelli, A.L. 2006. Micronutrientes en la fisiología de las plantas. Pp 11–28. En: M. Vázquez (Ed.), Micronutrientes en la agricultura. AACCS. 207 pp.
- Ferraris, G.N. 2011. Micronutrientes en cultivos extensivos ¿Necesidad actual o tecnología para el futuro? Pp. 121–133. En: F.O. García y A. Correndo (Ed.), Simposio Fertilidad 2011. La nutrición de cultivos integrada al sistema productivo.
- Ferraris, G. y L. Couretot. 2011. Fertilización con micronutrientes en soja. Experiencias en la región centro norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe. Mercosoja 2011. Quinto congreso de la soja del Mercosur, Rosario.
- Ferraris, G. y L. Couretot. 2013. Micronutrientes en región pampeana argentina: posicionamiento y tecnología de aplicación. Actas del Simposio Fertilizar 2013. Nutrición de cultivos para la intensificación productiva sustentable.
- Melgar, R.; J. Lavandera; M. Torres Duggan y L. Ventimiglia. 2001. Respuesta a la fertilización con zinc y boro en sistemas intensivos de producción de maíz. Ci. Suelo (Argentina) 19(2): 109-114.
- Michiels, C.L. y M.L. Ruffo. 2012. El Zinc limita el rendimiento del maíz en la región pampeana. Actas del XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata. (En CD).
- Sainz Rozas, H. 2012. Disponibilidad de micronutrientes en suelos de la región pampeana Argentina. Actas de la jornada técnica Micronutrientes 2012. Fertilizar AC.
- Sainz Rozas, H. 2012b. Micronutrientes en la región pampeana. Revista Fertilizar 24: 29-31.
- Salvagiotti, F. 2013. Respuesta a la fertilización con boro en soja en el sur de Santa Fe. Informe técnico. Disponible en: http://inta.gob.ar/documentos/respuesta-a-la-fertilizacion-con-boro-en-soja-en-el-sur-de-santa-fe/at_multi_download/file/INTA-%20Respuesta-fertilizacion-boro-en-soja.pdf.
- Tisdale, S.L.; W.L. Nelson; J.D. Beaton y J.L. Havlin. 1993. Soil Fertility and Fertilizers. 5th

- ed. Prentice – Hall, Inc. Nueva Jersey. 633 pp.
- Torri, S.I.; S. Urricariet y R.S. Lavado. 2006. Microelementos y otros elementos trazas. Pp 189–205. En H.E. Echeverría y F. García (Ed.), Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires. 525 pp.
- Torri, S.I.; S. Urricariet; G. Ferraris y R.S. Lavado. 2010. Micronutrientes en agroecosistemas. Pp 395–423. En: R. Álvarez; G. Rubio; C.R. Álvarez y R.S. Lavado (Ed.), Fertilidad de Suelos. Caracterización y manejo en la región pampeana. Editorial FAUBA, Buenos Aires. 496 pp.

Muestreo de suelos

Juan Cruz Colazo y Juan de Dios Herrero
EEA INTA San Luis

1. Objetivos e importancia

El muestreo de suelos es una herramienta fundamental para la planificación agropecuaria. Este puede tener diferentes fines: a) caracterización general de un lote o establecimiento para decidir su compra o arrendamiento, b) evaluación y control de prácticas de manejo (sistemas de labranza, secuencia de cultivos) mediante el uso de indicadores de calidad de suelo, c) detección de problemas específicos (acidez, salinidad, alcalinidad, contaminación) y d) el diagnóstico de la fertilidad química (Bono et al., 2012).

El objetivo del muestreo en la mayoría de estas situaciones es obtener una muestra representativa de la unidad de manejo. Se entiende por tal a la superficie en la cual se aplicarán las mismas prácticas de manejo. En general, la unidad de manejo coincide con el lote en producción o puede ser una parte de él (manejo por ambientes, agricultura de precisión). Con el muestreo de suelos se pretende lograr estimadores de los valores poblacionales³ de las variables de interés que no excedan un error aceptable con el mínimo costo y esfuerzo aceptable (Steinbach y Álvarez, 2012).

2. Principales parámetros de evaluación

Se pueden distinguir dos etapas en la evaluación de las condiciones de fertilidad de un suelo (Rubio et al., 2005):

1) Evaluación de la capacidad productiva: esta etapa consiste en la determinación de la aptitud de un suelo para el crecimiento de los cultivos. A partir de este diagnóstico se individualizan las limitantes primarias del suelo, las cuales una vez identificadas son clasificadas de acuerdo a un orden jerárquico. Esta información es complementada con datos climáticos y con características morfológicas y de paisaje identificadas a campo. Las limitaciones primarias pueden relacionarse con acidez, salinidad y alcalinidad. Los parámetros utilizados para evaluar estas limitantes son el pH y la conductividad eléctrica.

- **pH:** el potencial hidrógeno (pH) indica el predominio de especies y reacciones químicas en el suelo. Valores inferiores a 6,5 indican limitaciones por acidez y valores superiores a 8,5 por alcalinidad. Estas limitaciones se asocian a una menor disponibilidad de nutrientes y en casos extremos a toxicidad. El pH actual se determina por potenciometría con una relación suelo: agua de 1:2,5.
- **Conductividad eléctrica:** debido a que la concentración de sales varía a medida que cambia el contenido de agua del suelo; la salinidad del suelo se mide y expresa normalmente según la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo (CEe). La CEe se define como la conductividad eléctrica de la solución del agua del

³ En teoría estadística representan a los valores verdaderos de las variables de interés.

suelo después de añadir una cantidad de agua destilada suficiente para llevar el contenido de agua del suelo a punto de saturación. Típicamente, la CEE se expresa en deciSiemens por metro (dS m^{-1}) (Allen et al., 2006).

Otro parámetro importante que define la capacidad productiva de un suelo, en especial en zonas semiáridas, es la textura de este. Las limitaciones por textura se relacionan con la capacidad para retener agua. La textura de un suelo se define como la proporción (%) de arcilla, limo y arena. Los métodos más utilizados para determinarla son el método de Bouyoucos y el de la pipeta.

2) Diagnóstico de la disponibilidad de nutrientes: Esta es una etapa posterior e independiente en el proceso de caracterización de un suelo. A continuación se detallan los principales parámetros relacionados con la fertilidad química.

- Nitrógeno: la disponibilidad de nitrógeno mineral para las plantas es estimada por medio del nitrógeno bajo la forma de nitratos. El contenido de nitratos se determina por espectrofotometría, los extractantes más utilizados son el ácido cromotrópico, el ácido fenoldisulfónico y el reactivo SNEDD ($\text{CuSO}_4 + \text{H}_3\text{BO}_3$).
- Fósforo: el contenido de fósforo disponible para las plantas es estimado mediante el uso una solución extractora, que simula los mecanismos en la solución del suelo que posibilitan la absorción de fósforo durante el ciclo de un cultivo. En suelos neutros y ácidos el método de Bray I modificado es el más utilizado.
- Carbono orgánico: el contenido de carbono orgánico (CO) es estimado a través de la determinación del carbono oxidable por el método de Walkley y Black. A partir del contenido de CO es inferido el contenido de materia orgánica (MO). La importancia primaria de la MO en la fertilidad química radica por sus contenidos de nutrientes en especial de N y S. En el caso de N es utilizado como estimador de la mineralización durante el ciclo de un cultivo. También al relacionarse con propiedades físicas y biológicas de suelo, el contenido de MO ha sido propuesto como un indicador de calidad de suelos. Sin embargo, para la correcta interpretación de este parámetro como un indicador se combinar con valores de textura (Quiroga y Funaro, 2004).

3. Variabilidad espacial y temporal de las distintas propiedades de suelo. Aspectos relacionados con la fertilidad química

3.1. Variabilidad espacial horizontal y su relación con el número de submuestras

Los suelos son heterogéneos presentando una alta variabilidad de sus características de fertilidad (Steinbach y Álvarez, 2012). Esta variabilidad puede ser natural asociada a diferentes tipos de suelos, cambios en pendientes o topografía que ocurren a gran escala. También existen diferencias por manejo que se deben a diferentes cultivos antecesores, erosión, aplicación previa de fertilizantes o sectores de acumulación de hacienda (García y Bianchini, 2005).

Algunas propiedades tienen una mayor variabilidad que otras. Existe una relación entre la variabilidad y el error con el que se estima la muestra. En muestras con distribución normal, a medida que disminuye el error aceptado aumenta exponencialmente el número de submuestras. Este error aceptado debe ser lo suficientemente pequeño para no inducir a recomendaciones de fertilización erróneas.

Estudios realizados en la región pampeana han indicado que la variabilidad de las propiedades se incrementa en este orden: carbono orgánico < nitratos = pH < fósforo extractable y para no superar un error aceptable era necesario tomar entre 10–12 submuestras para

carbono orgánico ($\pm 0,2\%$), 15–25 para nitrógeno ($\pm 0,7$ ppm N-NO₃⁻), entre 6–25 para pH ($\pm 0,1$ unidades) y entre 45–55 para fósforo extractable ($\pm 1,1$ ppm de P).

El fósforo es el nutriente que mayor variabilidad en el plano horizontal presenta. Es por ello, que a nivel de producción es común encontrar registros de niveles de fósforo de lotes que presentan cambios enormes entre muestreos sin un patrón definido. Para tener resultados confiables se deberían realizar unas 50 sub-muestras. En la práctica esta cantidad es excesiva. Por lo que para el P se recomienda un muestreo intensivo cada 2-4 años y en lugar de uno de baja intensidad todos los años (Steinbach y Álvarez, 2012).

3.2. Variabilidad vertical y su relación con la profundidad de muestreo

Para determinar la profundidad de muestreo se debe conocer como varían las propiedades en el perfil de suelo explorado por las raíces y en qué medida el manejo puede modificar esta variación (Steinbach y Álvarez, 2012).

pH: el patrón de variabilidad del pH es diferente entre tipos de suelos. En nuestros ambientes este se asocia a procesos tales como la acumulación de carbonatos y el ascenso capilar desde una capa freática (Figura 1). El manejo tiene poco impacto sobre esta distribución. En consecuencia, para diseñar muestreos con fines de determinar pH hay que tener en cuenta el objetivo del muestreo: Si es para determinar acidez en suelos cultivados el muestreo recomendado es de 0-20 cm, en cambio para diagnosticar situaciones de alcalinidad es necesario realizar muestreos en profundidad.

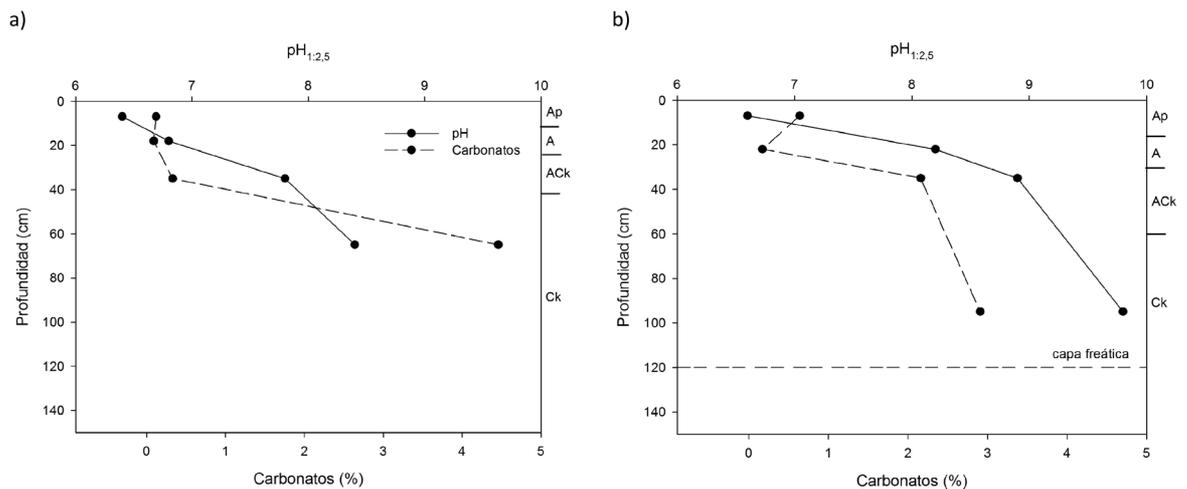


Figura 1. Variación de valores de pH y carbonatos en profundidad en suelos de la serie a) Comandante Granville (Calicata 3-819) y b) Estancia La Unión (Calicata 3-575). Adaptado de Peña Zubiarte et al., inédito.

Carbono orgánico: el carbono orgánico varía en el perfil del suelo siguiendo un patrón similar al de las raíces. Es alta la concentración en estratos superiores y disminuye exponencialmente en profundidad (Figura 2a). Esta diferencia entre estratos es menor en regiones semiáridas comparadas con regiones más húmedas. El manejo afecta los contenidos de carbono orgánico en el estrato superficial. En suelos cultivados sin remoción se encuentra fuerte estratificado, mientras que donde se presentan manejos con labranza muestra una distribución relativamente constante hasta la profundidad de laboreo (Figura 2b).

La profundidad de muestreo depende del objetivo. Cuando se pretende cuantificar este parámetro como indicador se toman muestras de los primeros 20–30 cm. En caso de sistemas de labranzas como siembra directa se recomienda separar las muestras en inter-

valos de 0–5 cm, 5–10 cm y 10–20 cm. Para valores de stock de carbono se recomiendan valores mínimos de 30 cm, idealmente de 1 m de profundidad estratificados por horizonte y acompañados de valores de densidad aparente (Andriulo et al., 2012).

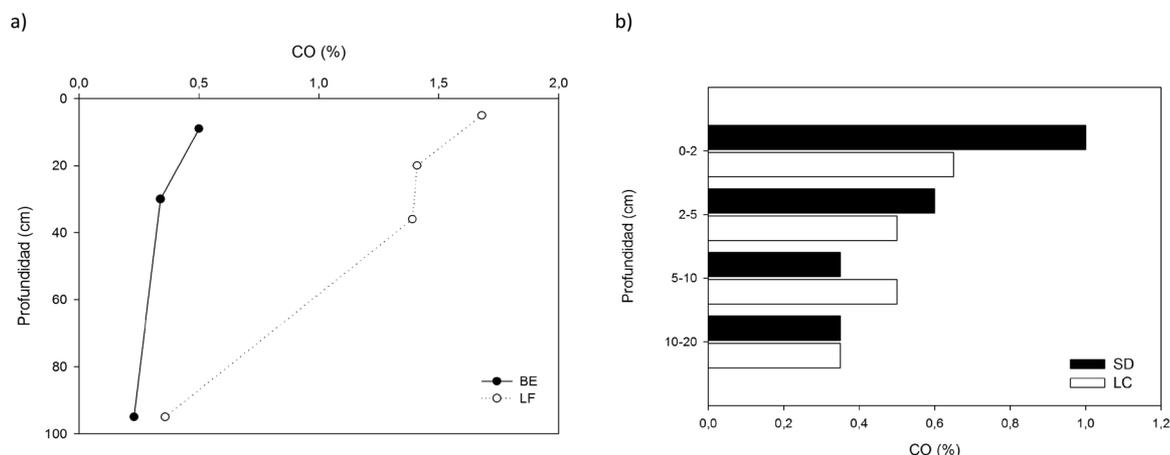


Figura 2a. Variación en profundidad del contenido de carbono orgánico (CO) en un Ustipsamente Típico, serie Buena Esperanza (BE) y en un Haplustol Entico, serie La Florida (LF); **b)** Contenido de carbono orgánico en diferentes estratos, según el tipo de labranza: siembra directa (SD) y labranza convencional (LC) luego de cuatro años en un suelo Ustipsamente Típico, serie Cramer. Adaptado de Veneciano et al. (2009).

Nitrógeno: los nitratos se encuentran estratificados en el perfil, con concentraciones mayores en la capa superficial. En la región semiárida pampeana, en un análisis de la distribución vertical de nitratos (n=404, de los cuales 37 pertenecían a Psamientos del S de San Luis) se encontró que la concentración cada 20 cm respecto a la concentración de la capa superior disminuye un 90% en la capa de 20–40 cm y un 70% en la de 40–60 cm (Bono y Álvarez, 2007). La mayoría de las metodologías de diagnóstico y recomendación de fertilización requieren la cuantificación de la concentración de nitratos en los primeros 60 cm (Steinbach y Álvarez, 2012). En la práctica para economizar tiempo, esfuerzo y dinero suele tomarse junto con la muestra de los primeros 20 cm una muestra compuesta de 20–60 cm, o debido a que la concentración de 0–60 cm se encuentra altamente correlacionada con la concentración de los 20 cm superficiales; los primeros son estimados utilizando una ecuación que los relacione (Bono y Álvarez, 2007).

Fósforo: el fósforo extractable también presenta una importante estratificación en el perfil, siendo mayor este efecto en suelos bajo siembra directa comparados con labranza convencional. Sin embargo, el uso de profundidades menores en lugar del estrato 0–20 cm no mejora el diagnóstico de la respuesta a la fertilización (Barbagelata, 2012). La mayoría de los valores umbrales para los principales cultivos en la región pampeana se encuentran calibrados para dicha profundidad. Es por ello, que se recomienda muestrear los primeros 20 cm.

3.3. Variación temporal y su relación con el momento y frecuencia del muestreo

El análisis de la variabilidad temporal permite evaluar la sensibilidad de las propiedades

relacionadas con la fertilidad ante cambios ambientales y de manejo, y por lo tanto en el corto plazo definir el momento y en el largo plazo la frecuencia del muestreo.

El contenido de pH, CE, textura, P y CO puede tomarse en cualquier época del año, pero se deben elegir preferentemente los mismos meses (Bono et al., 2012). Algunos autores recomiendan para el caso de CO, muestrear posteriormente a la cosecha de los cultivos, siendo ventajoso en otoño-invierno, luego de los cultivos de verano, de modo que el suelo no haya presentado disturbios físicos importantes (Andriulo et al., 2012). Además, durante esta época debido a la menor actividad biológica existe una menor variabilidad en los resultados (Conti, 2005).

Algunas variables son altamente estables. El pH es una ellas. En suelos cultivados que no reciben enmiendas una escala de varios años es suficiente. El carbono orgánico es afectado por el manejo en la escala de años a décadas, por lo que para detectar cambios son necesarios períodos de varios años. El P tampoco presenta variaciones anuales importantes por lo que el espaciamiento puede ser de varios años. En cambio el contenido de nitratos es temporalmente muy variable debido a su movilidad y dinámica en el suelo (balance entre mineralización, inmovilización, lixiviación y pérdidas). En función de esta variabilidad el muestreo para la disponibilidad de N mineral debe realizarse lo más cercano posible al momento en que se decida realizar la fertilización nitrogenada (Steinbach y Álvarez, 2012). Este momento, debe ser suficiente teniendo en cuenta los tiempos del laboratorio y la logística de fertilización.

4. Patrones de muestreo

En la literatura se citan diferentes tipos de muestreo: aleatorio, aleatorio estratificado y sistemático (Peterson y Calvin, 1996). De estos, los métodos aleatorios son los más utilizados. Para la aleatorización de muestras se puede recurrir a un sistema de coordenadas, que permite seleccionar al azar puntos dentro de la unidad de manejo. Sin embargo, en la práctica se sugieren patrones de muestreo que capten la mayor variabilidad en el plano horizontal (largo y ancho de la unidad de manejo) siendo el más común el muestreo en zigzag.

Para reducir los costos en la mayoría de los casos se utiliza una muestra compuesta formada por la mezcla de diferentes submuestras para cada unidad de manejo. Una alternativa para el seguimiento en el largo plazo es la utilización de zonas o puntos de referencia (<1 ha) que sean representativos de la unidad de manejo (Pennock et al., 2002), esta metodología combinada con el uso del GPS permite regresar al mismo lugar con una mayor precisión.

La presencia de animales en el lote, ya sea en el presente o en el pasado debe ser tenida en cuenta a la hora de muestrear un lote. El patrón de deposición, tanto sólida como líquida es desuniforme, concentrándose en ciertos sectores como aguadas, montes o cerca de alambrados (Rubio y Álvarez, 2010). Por lo tanto, es fundamental evitar estos sectores.

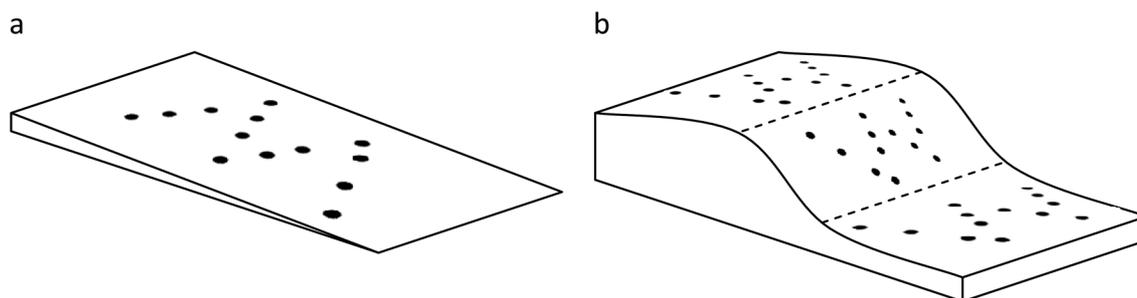


Figura 3. a) Muestreo en zigzag, **b)** muestreo en zigzag estratificado por relieve.
Elaboración propia.

5. Determinación de la unidad de manejo

La determinación de una unidad de manejo o ambiente es un proceso de simplificación de la variabilidad productiva existente en un lote, establecimiento o región. En la práctica este proceso es iterativo. En un primer lugar se plantea la hipótesis de la existencia de distintos ambientes productivos, delimitando diferentes ambientes basándose en la integración y gestión de información georeferenciada disponible: mapas de rendimiento, topografía, cartas de suelos, imágenes satelitales, estimación de profundidad de tosca y napas, etc. Una vez definidos los ambientes estos se caracterizan por muestreos dirigidos de suelos, se rectifican los límites y se retroalimentan con la acumulación de información a lo largo del tiempo (Bermúdez, 2011).

6. Superficie de muestreo

Las recomendaciones sobre la superficie a muestrear son variables. Darwich (1998) recomienda una muestra cada 20 ha. Conti (2005) sugiere en suelos con cultivos extensivos una muestra cada 10–50 ha, y en superficies homogéneas y extensas sin fertilizar, una cada 50–100 ha. Con respecto a número de sub-muestras, estudios realizados en lotes de 10-40 ha confirman que al aumentar la superficie el doble, se debería incrementar el número de submuestras en un 10% con respecto a la media (Roberts y Henry, 2000).

7. Elementos utilizados para el muestreo

El elemento más adecuado para muestrear suelos es el barreno porque produce muestras homogéneas de igual volumen y profundidad (Darwich, 1998). El barreno debe encontrarse en lo posible afilado, fabricado de acero inoxidable y libre de herrumbre (Roberts y Henry, 2000). Se debe evitar el uso de material galvanizado, en especial si se desea determinar micronutrientes.

En el mercado existen distintos tipos de barrenos. Por un lado están los barrenos acanalados o caladores (Figura 4b,c) Para tomar una muestra compuesta es recomendable acompañar a los mismos con un balde. Sin embargo, existen muestreadores desarrollados para este fin (Figura 4a), los cuales cuentan con un dispositivo para pisar y recoger la muestra

gracias a un tubo de entrada de sección cónica. Estos dispositivos son muy prácticos para tomar gran número de submuestras. Por el otro lado se encuentran los barrenos de tipo helicoidal (Figura 4d), los cuales son menos prácticos a la hora de sacar un gran número de submuestras, pero son útiles en condiciones de suelos de textura fina y con bajos contenidos de humedad; y cuando se requiere sacar muestras a diferentes profundidades en un mismo punto, como es el caso de la determinación de humedad.

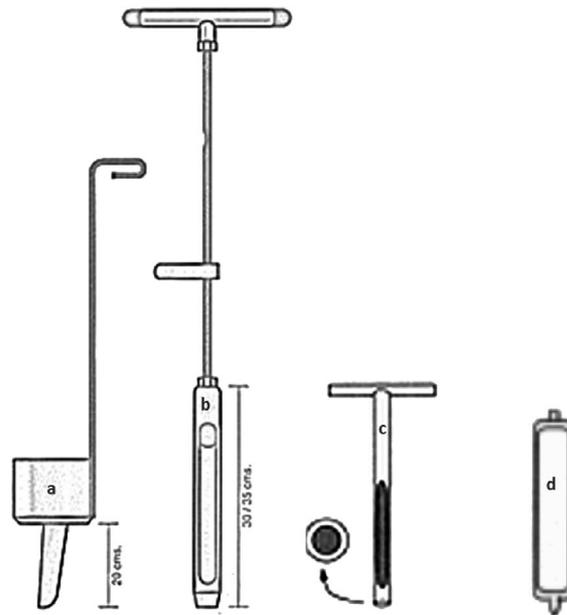


Figura 4. Diferentes tipos de barrenos. Elaboración propia.

La muestra también se puede tomar con una pala. En este caso se debe abrir un hueco en forma de “V” a la profundidad deseada, se corta una tajada de 2-3 cm de grosor de uno de los lados de la “V”, y una vez que se tiene la tajada del suelo en la pala se eliminan los bordes hasta alcanzar unos 3 cm de ancho a lo largo de toda la profundidad (Conti, 2005).

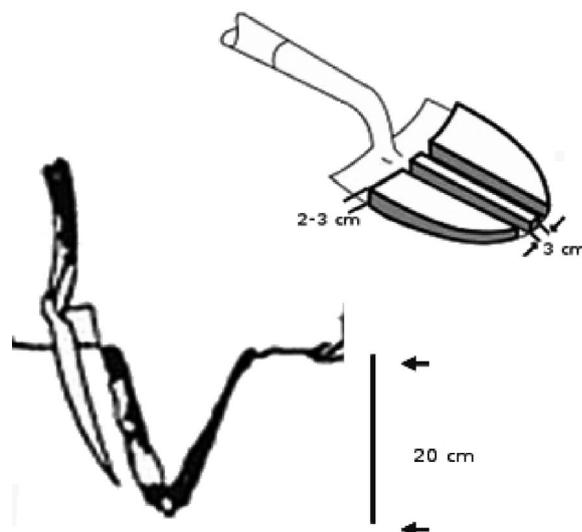


Figura 5. Toma de muestra con pala. Elaboración propia.

8. Preparación de la muestra

Una vez tomada la muestra esta puede cuartearse. El cuarteo es un método de disminución sistemática de la muestra por medio de la división en cuartos. El suelo se extiende sobre una superficie limpia y se parte en cuartos por medio de una cruz y se procede a la eliminación de dos cuartos opuestos. El material se mezcla nuevamente y se vuelve a cuartear hasta alcanzar el tamaño deseado (Conti, 2005). No es necesario más de 500 g. Dicha muestra debe rotularse con indicaciones claras. Es necesario que la bolsa se encuentre sin usar para evitar contaminación. Es recomendable para el etiquetado el uso de doble bolsa y colocar la etiqueta entreestas, o el uso de etiquetas autoadhesivas. Es conveniente remitir la muestra lo más rápido posible al laboratorio. En el caso de que esto no sea posible y se desee determinar el contenido de nitratos se recomienda almacenar la muestra en frío.

9. Aspectos del muestreo de parámetros físicos de suelos

En términos generales, los patrones de muestreo recomendados para parámetros físicos son los aleatorios simples o el uso de transectas, eligiendo zonas homogéneas que sean representativas del estado físico del lote o unidad de manejo (Cazorla et al., 2012). Para determinar el número de muestras se ha analizado la variabilidad de las propiedades físicas (Warrik, 1998). En general, se propone agrupar a estas en a) parámetros de capacidad, los cuales poseen un menor coeficiente de variación ($cv < 15$), siendo la textura y la porosidad propiedades características de este grupo; y b) parámetros de transporte, los cuales son propiedades dinámicas, con mayores coeficientes de variación ($cv > 15$), como la conductividad hidráulica y la infiltración. El contenido de humedad podría clasificarse como una propiedad intermedia entre ambos grupos (Kutilek y Nielsen, 1994; Warrik, 1998). A continuación se resumen los aspectos del muestreo a campo de las principales propiedades físicas que determinan el crecimiento de los cultivos y la dinámica de agua⁴.

9.1. Densidad aparente

La densidad aparente indica la relación entre el peso seco y el volumen del suelo. Entre las propiedades físicas posee la menor variabilidad ($cv \approx 10$) por lo que se recomiendan entre 3–5 muestras para caracterizar un sitio. Es un indicador que sirve para identificar procesos de compactación, pero también permite la conversión de unidades de concentración a masa y volumen (Grossman y Reinsch, 2002).

El método más utilizado es el del cilindro. Se sugiere tomar la muestra con la ayuda de muestreadores específicos o usando un estribo. No se debe tomar la muestra ni muy seca (mayor probabilidad de desgranamiento y fragmentación) ni muy húmeda (sobre compactación), siendo el contenido ideal el cercano a capacidad de campo. En relación con el

⁴ Para mayor información sobre aspectos relacionados se sugiere las guías realizadas por Michelena et al. (2010) y Santos et al. (2012) disponibles online en <http://www.inta.gov.ar>.

cilindro, se sugiere que la relación diámetro: altura sea de 1,25–2 (Cazorla et al., 2012). En el caso de utilizar cilindros de acero inoxidable, los diámetros en general se encuentran Estándarizados en unidades de pulgadas, lo más utilizados son los de 3 y 4 pulgadas ($\approx 7,5$ cm y 10 cm, respectivamente), con alturas entre 5-6 cm.

Para medir el efecto de las labranzas se toman muestras superficiales, y para transformar unidades en stock de carbono o lámina de agua se muestrea por horizonte en una calicata. El momento más adecuado es durante el otoño–invierno.

9.2. Resistencia a la penetración

La resistencia a la penetración puede ser evaluada utilizando penetrómetros de golpe o penetrómetros digitales disponibles comercialmente. En general, la forma de muestreo es en transectas. El momento de muestreo dependerá del objetivo, para comparar labranzas es conveniente realizarlo en condiciones de homogéneas de humedad, preferentemente en contenidos próximos a capacidad de campo. Para detectar restricciones para el crecimiento radicular de los cultivos, el muestreo se debe realizar en suelos con contenidos de humedades inferiores. En ambas situaciones las mediciones deben acompañarse con datos de humedad (Cazorla et al., 2012).

9.3. Infiltración

Existen varios métodos para determinar infiltración a campo (Tabla 1). Se sugiere un mínimo de cuatro determinaciones por tratamiento. El momento de muestreo dependerá del objetivo, en suelos cultivados se sugiere que exista un mínimo de un mes luego de la labranza (Michelena et al., 2010).

Tabla 1. Comparación de métodos de infiltración (Michelena et al., 2010).

Infiltrómetro de anillo simple	Simulador de lluvias	Infiltrómetro de disco
Con carga hidráulica	Sin carga hidráulica Con impacto de gota	Con/Sin carga hidráulica
Sencillo y operativo	Requiere más tiempo operativo	Sencillo y operativo
Infiltración instantánea y acumulada	Infiltración instantánea y acumulada. Información sobre el estado físico del suelo. Escurrimiento e índice de erosión	Infiltración instantánea y acumulada. Macroporosidad.
Ambiente natural	Ambiente natural	Ambiente modificado
Posibilidad de muchas repeticiones	Posibilidad de pocas repeticiones	Posibilidad de muchas repeticiones
Construcción sencilla	Construcción compleja	Construcción sencilla
Bajo costo	Alto costo	Bajo costo

9.4. Humedad

Se recomienda realizar muestreos separados por ambientes topográficos (Mohanty et al., 2000). Es escasa la información sobre el número de perfiles adecuados por ambiente. Adicionalmente, dentro de un mismo ambiente la variabilidad del contenido de humedad es mayor cuando el suelo se encuentra más seco (Warrick, 1999; Mohanty, 2000; Figura 6). Teniendo en cuenta estos aspectos, se recomienda entre 3–5 perfiles por unidad de manejo según el compromiso entre la precisión y el esfuerzo.

La frecuencia de muestreo depende de los objetivos, sin embargo se aconsejan como mínimo dos momentos: siembra y cosecha de los cultivos, siendo también adecuado incluir el período crítico de los cultivos o momentos previos a decidir una fertilización postergada. La profundidad de muestreo recomendada es de 2 m para cultivos estivales, aunque esta puede estar influenciada por características de suelo (capa freática, tosca, roca). En general, se recomienda muestrear cada 20 cm de profundidad, utilizando un barreno helicoidal o en su defecto determinaciones por horizonte (Quiroga et al., 2007; Álvarez et al., 2012).

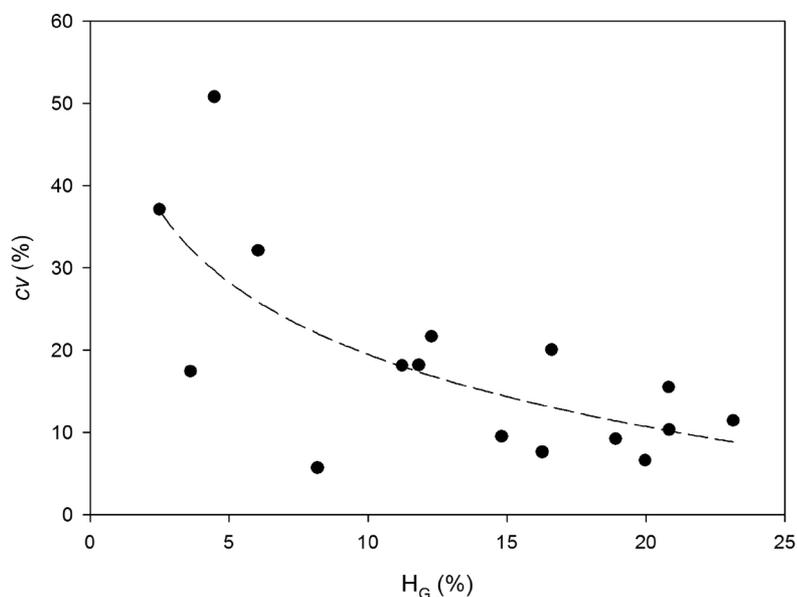


Figura 6. Relación entre el coeficiente de variación (cv) y el contenido medio de humedad gravimétrica (HG) en los primeros 5 cm de un suelo Haplustol Entico serie VILLA MERCEDES. Datos sin publicar. (n=5).

10. Consideraciones finales

La Tabla 2 muestra un resumen de los principales puntos discutidos en los párrafos anteriores:

Tabla 2. Profundidad de muestreo, momento, frecuencia y número de submuestras para los principales parámetros de evaluación en muestreos de suelos. Elaborado a partir de información de Bono et al. (2012) y Steinbach y Álvarez (2012).

Parámetro	Profundidad (cm)	Momento	Frecuencia	Sub-muestras
pH	0 – 20, cada 20 cm hasta capa freática	En cualquier época del año. Preferentemente	2 – 4 años	25
CE	0 – 20, cada 20 cm hasta capa freática	en elegir los mismos meses del año	2 – 4 años	25
CO	0 – 20, 0 – 30, 0 – 100 (por horizonte).	Después de cosecha	2 – 4 años	25
NO ₃ ⁻	0-20, 20 – 40, 40 – 60, 20 – 60	Antes de fertilizar	Cada vez que se realiza un cultivo	25
P	0 – 20	En cualquier época del año. Preferentemente	2 – 4 años	50
Textura	0 – 20	en elegir los mismos meses del año	Una vez	25

11. Bibliografía

- Allen, R.G.; L.S. Pereira; D. Raes y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje 56. FAO, Roma. 323 pp.
- Álvarez, C.; J. Andriani; M. Eiza; R. Fernández; R. Gil; R. Michelena y H. Sanchez. 2012. Agua del suelo. Pp 57–68. En: D.J. Santos; M.G. Wilson y M. Ostinelli (Ed.), Metodologías de muestreo de suelo y ensayos a campo. Ediciones INTA, Paraná. 70 pp.
- Andriulo, A.; M. Basanta; C. Galarza; A.M. Lupi; M. Ostinelli; A. Quiroga y M.C. Sánchez. 2012. Pp 15–24. Carbono orgánico del suelo. En: D.J. Santos; M.G. Wilson y M. Ostinelli (Ed.), Metodologías de muestreo de suelo y ensayos a campo. Ediciones INTA, Paraná. 70 pp.
- Barbagelata, P. 2012. Manejo del fósforo en suelos de regiones templadas. Actas del XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata. (En CD).
- Bermúdez, M. 2011. Como llevar a la práctica en gran escala el manejo sitio específico de N y P. Pp 47–54. En: F. García y A. Correndo (Ed.), Simposio Fertilidad 2011. La nutri-

- ción de cultivos integrada al sistema productivo. IPNI.
- Bono, A. y R. Álvarez. 2007. Estimación de nitratos en profundidad. *Informaciones Agronómicas* 33: 25–26.
- Bono, A.; A. Quiroga; P. Azcárate y N. Kloster. 2012. Muestreo e interpretación de análisis de suelo. Pp 141–150. En: A. Quiroga y A. Bono (Ed.), *Manual de fertilidad y evaluación de suelos*. Publicación Técnica 89. INTA Anguil. 162 pp.
- Cazorla, C.; J.J. De Batista; M. Ferrari; O. Gudelj; A. Quiroga; C. Sasal; M. Taboada y M. Wilson. 2012. Estructura del suelo. Pp 25–56. En: D.J. Santos, M.G. Wilson y M. Ostinelli (Ed.), *Metodologías de muestreo de suelo y ensayos a campo*. Ediciones INTA, Paraná. 70 pp.
- Conti, M. 2005. Toma de muestra de suelo. Pp 55–64. En: L. Marbán y S.E. Ratto (Ed.). *Tecnologías en análisis de suelos*. AACCS, Buenos Aires. 216 pp.
- Darwich 1998. *Manual de Fertilidad de Suelos y uso de Fertilizantes*. 182 pp.
- García, F. y A. Bianchini. 2005. Fuentes de fertilizantes y sistemas de aplicación. Pp. 471–487. En H.E. Echeverría y F. García (Ed.), *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires. 525 pp.
- Grossman, R.B. y T.G. Reinsch. 2002. Bulk density and linear extensibility. Pp. 201–228. In: J.H. Dane y G.C. Topp (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 4-Physical methods*. SSSA Book series 5. SSSA y ASA. Madison, WI, EE.UU. 1692 pp. Kutilek, M. y D.R. Nielsen. 1994. *Soil hydrology*. Catena Verlag GMB. 370 pp.
- Michelena, R.; C. Iruetia; M. Eiza; P. Carfagno y T. Pirolo. 2010. *Manual de procedimientos de análisis físicos de suelos*. 10 pp.
- Mohanty, B.P.; T.H. Skaggs y J.S. Famiglietti. 2000. Analysis and mapping of field-scale soil moisture variability using high-resolution, ground-based data during the Southern Great Plains 1997 (SGP97) Hydrology Experiment. *W. Resources Res.* 36(4): 1023–1031.
- Peña Zubiarte, C.A.; A. d'Hiriart y J.C. Colazo. Inédito. *Datos analíticos del reconocimiento de suelos de la provincia de San Luis*. 742 pp.
- Pennock, D.; T. Yates y J. Braidek. 2002. Soil sampling design. Pp 1–14. In: M.R. Carter y E.G. Gregorich (Ed.), *Soil sampling and methods for analysis*. 2nd Edition. Can. Soc. Soil Sci. CRC Press, Boca Ratón. 1263 pp.
- Peterson, R.G. y L.D. Calvin. 1996. Sampling. Pp 1–18. In: DL Sparks (Ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 3–Chemical Methods*. SSSA Book series 5. SSSA y ASA. 1390 pp.
- Quiroga, A. 2012. Necesidad de reconocer, jerarquizar y categorizar factores que afectan la producción y sustentabilidad. Pp 5–9. En: A Corro Molas y E Ghironi (Ed.), *Avances en agricultura por ambientes en la región semiárida pampeana*. Publicación Técnica 90. EEA INTA Anguil.
- Quiroga, A. y D. Funaro. 2004. *Materia orgánica. Factores que condicionan su utilización como indicador de calidad en Molisoles, de las Regiones Semiárida y Subhúmeda Pampeana*. Actas del XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná.
- Quiroga, A.R.; R. Fernández; P. Azcárate y A. Bono. 2007. Agua del suelo. Bases funcionales para su manejo. Pp 35-50. En: A Quiroga y A Bono (Ed.), *Manual de fertilidad y evaluación de suelos*. Publicación Técnica 71. INTA Anguil.
- Roberts, T.L. y J.L. Henry. 2000. El muestreo de suelos: los beneficios de un buen trabajo. *Informaciones Agronómicas* 8: 7–10.
- Rubio, G. y C.R. Álvarez. 2010. Fósforo: Dinámica y evaluación en agroecosistemas. Pp 311–336. En: R. Álvarez, G. Rubio, C.R. Álvarez y R.S. Lavado (Ed.), *Fertilidad de Suelos. Caracterización y manejos en la región pampeana*. Editorial FAUBA, Buenos

- Aires. 496 pp.
- Rubio, G.; R. Álvarez y F. Gutiérrez Boem. 2005. Diagnóstico de la capacidad productiva de los suelos. En: R. Álvarez (Ed.), Fertilización de cultivos de grano y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la región pampeana. Editorial FAUBA. 3–12 pp.
- Steinbach, H. y R. Álvarez. 2012. Análisis de la variabilidad de la fertilidad del suelo. Pp 27–50. En: R. Álvarez; P. Prystupa; M.B. Rodríguez; C.R. Álvarez (Ed.), Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la región pampeana. 1.º edición. Editorial FAUBA. Buenos Aires. 656 pp.
- Sumner, M. 2000. Diagnóstico de los requerimientos de fertilización de cultivos extensivos. Actas del VIII Congreso Argentino de Siembra Directa, Mar del Plata (En CD).
- Veneciano, J; O. Barbosa; J. Casagrande; K. Frigerio; J. Garay; F. Galarza, M. Cortes; R. Cerdá y C. Frasinelli. 2009. Efectos acumulados del manejo en el suelo. Pp 51–56. En: A Quiroga; J Casagrande y JC Colazo (Ed.), Aspectos de la evaluación y el manejo de los suelos en el este de San Luis. Información Técnica 173, INTA San Luis.
- Warrick, A. 1998. Spatial variability. Pp 655–675. In: D. Hillel (Ed.). Environmental soil physics. Academic press. 801 pp.

Interpretación de análisis de suelos. Manejo de unidades de nitratos y fósforo disponible

Juan Cruz Colazo y Juan de Dios Herrero
EEA INTA San Luis

1. Introducción

En general los valores de parámetros como nitrógeno (N) y fósforo (P) indicados en un análisis de suelo están expresados en forma de concentraciones y, por ende, con sus unidades correspondientes. En el caso del fósforo disponible (Pd) y el contenido de nitratos (NO_3^-), debido a sus relativas bajas concentraciones en la masa del suelo, son indicados en partes por millón (ppm). Como su nombre lo indica esto representa que 1 unidad de Pd o NO_3^- se encuentra contenida en un millón de unidades de suelo. Referida a pesos; 1 ppm de X representa 1 mg (miligramo) X/kg suelo, o a fines prácticos es recomendable expresarlo como 1 g X/t (tonelada) suelo. En cambio, otros elementos como la materia orgánica (MO), debido a su mayor concentración se recomienda expresarla en porcentaje (%), es decir 1 kg/100 kg suelo o 10 kg/t suelo.

2. Relación entre concentración y unidades de masa y volumen

Si bien ahora sabemos que los datos expresados en partes por millón o porcentajes representan una cierta cantidad de gramos, estos gramos están referidos a toneladas de suelo; por lo tanto necesitamos un parámetro que relacione el valor de toneladas de suelo y la superficie expresada en hectáreas de modo que podamos expresar el dato en kilogramos por hectárea. Este parámetro es la densidad aparente (DA), el cual relaciona el peso con el volumen de suelo y por consiguiente esta expresado en g/cm^3 o t/m^3 . Esta propiedad en un suelo depende fundamentalmente de la textura, la cual se encuentra presente en toda carta de suelos y es una propiedad de fácil estimación a campo de manera empírica (Tabla 1).

Tabla 1. Valores de densidad aparente estimados a partir del contenido de arena, utilizando suelos de la provincia de San Luis (n=15), utilizando datos publicados de Kirby et al. (2001).

Arena (%)	Densidad Aparente (g/cm^3 ; tn/m^3)
40 – 60	1,2
60 – 80	1,3
> 80	1,4

Para poder relacionar el volumen (m^3) con una medida de superficie como es la hectárea (10000 m^2) necesitamos conocer la profundidad de muestreo. En general tanto para las muestras de nitratos, Pd y MO, 20 cm es la profundidad recomendada. Por lo tanto conociendo o estimando la densidad aparente de los suelos, puedo conocer el peso de una hectárea de 20 cm de profundidad utilizando la siguiente expresión:

$$DA [\text{t suelo}/\text{m}^3] \times 10000 \text{ m}^2 \text{ 1 ha} \times 0,2 \text{ m} = A20 [\text{t suelo}/\text{ha}] \quad [1]$$

De la ecuación 1 se desprende que el peso de una hectárea de suelo de 20 cm de profundidad (A20) con una DA igual a 1 es 2000 t, con una DA igual a 1,2 es 2400 t y con una DA de 1,4 es 2800 t.

3. Fórmula general

Una vez calculado el peso de una hectárea y conociendo el valor en los análisis de suelo podemos llevar los datos de concentración (ppm) a cantidad por superficie (kg/ha):

$$1 \text{ ppm de P} = 1 \text{ g P/t suelo} \times \text{Valor A (t suelo/ha)} = x \text{ kg P/ha} \quad [2]$$

Así por ejemplo 1 ppm de un determinado elemento (X) en un suelo con una densidad aparente de 1,2 t/m³ determinado a una profundidad de 20 cm es equivalente a:

$$1 \text{ g X/t suelo} \times 2400 \text{ t suelo/ha} = 2400 \text{ g X/ha} = 2,4 \text{ kg X/ha}$$

En el caso de los valores expresados en porcentaje:

$$1\% \text{ MO} = 10 \text{ kg MO/t suelo} \times 2400 \text{ t suelo/ha} = 24000 \text{ kg MO/ha} = 24 \text{ t MO/ha.}$$

4. Consideraciones sobre el nitrógeno

Los modelos de recomendación de fertilización nitrogenada se basan en el contenido de nitrógeno bajo la forma de nitratos. En el laboratorio las técnicas analíticas determinan el contenido de nitratos (NO₃⁻), por lo que es muy importante diferenciar si el dato se encuentra expresado en nitratos (NO₃⁻) o como nitrógeno de nitratos (N-NO₃⁻). Este último caso se refiere a la cantidad de nitrógeno presente en la estructura química del nitrato. Para calcular este valor se multiplica el dato de nitratos por un factor de 0,2258. Así por ejemplo si el dato de nitratos es de 60 ppm, entonces el contenido de N-NO₃⁻ será de aproximadamente 13,5 ppm. Este último dato se multiplica por el valor A y se obtiene la cantidad de nitrógeno expresado en kg N/ha:

$$DA = 1,2 \text{ g/cm}^3 \rightarrow \text{Valor A}_{20} = 2400 \text{ t suelo/ha}$$

$$13,5 \text{ ppm N-NO}_3 = 13,5 \text{ g N-NO}_3 / \text{t suelo}$$

$$13,5 \text{ g N-NO}_3 / \text{t suelo} \times 2400 \text{ t suelo/ha} = 32400 \text{ g N-NO}_3 / \text{ha}$$

$$32,4 \text{ kg N-NO}_3 / \text{ha}$$

Una gran mayoría de métodos de recomendación de fertilización nitrogenada tienen en cuenta la concentración de N hasta los 60 cm de profundidad. Sin embargo muchas veces el muestreo hasta dicha profundidad no es frecuente por limitaciones de tiempo, esfuerzo y económicas. Es por ello que se ha desarrollado un modelo (Ecuación 3) que estima el contenido de nitratos utilizando como variable predictora el contenido en el estrato de 0–20 cm para muestras de la región semiárida pampeana válidos tanto para labranza convencional como para directa.

$$\text{NO}_{3\ 0-60} \text{ cm (kg ha}^{-1}\text{)} = \text{NO}_{3\ 0-20} \text{ cm (kg ha}^{-1}\text{)} \times 2,35 \quad [3]$$

La Tabla 2 muestra los valores de N-NO₃ en los primeros 60 cm (kg ha⁻¹) estimados a partir de la Ecuación 3 en función de la combinación de valores de NO₃ (ppm) en los primeros 20 cm y 3 niveles de densidad aparente en función de la textura de los suelos.

Tabla 2. Valores de nitrógeno de nitratos en los primeros 60 cm de profundidad (N_{0-60}) estimados a partir de la contenido de nitratos (NO_3) de los primeros 20 cm y 3 valores de densidad aparente (DA).

NO ₃	N-NO ₃	DA = 1,2		DA = 1,3		DA= 1,4	
		g cm ⁻³					
		N ₀₋₂₀	N ₀₋₆₀	N ₀₋₂₀	N ₀₋₆₀	N ₀₋₂₀	N ₀₋₆₀
Ppm		kg ha ⁻¹					
5	1	2,7	6	2,9	7	3,2	7
10	2	5,4	13	5,9	14	6,3	15
15	3	8,1	19	8,8	21	9,5	22
20	5	10,8	25	11,7	28	12,6	30
25	6	13,5	32	14,7	34	15,8	37
30	7	16,3	38	17,6	41	19,0	45
35	8	19,0	45	20,5	48	22,1	52
40	9	21,7	51	23,5	55	25,3	59
45	10	24,4	57	26,4	62	28,5	67
50	11	27,1	64	29,4	69	31,6	74
60	14	32,5	76	35,2	83	37,9	89
75	17	40,6	96	44,0	103	47,4	111
100	23	54,2	127	58,7	138	63,2	149
150	34	81,3	191	88,1	207	94,8	223
200	45	108,4	255	117,4	276	126,4	297

5. Consideraciones sobre el fósforo

En suelos ácidos y neutros las recomendaciones de fertilización fosforada se basan en valores umbrales de fósforo disponible extraído por el método de Bray y Kurtz. Estos umbrales son específicos para un determinado cultivo y en general están determinados a una profundidad de 20 cm.

Cuando se determina un espesor menor (ej. 15 cm), los valores umbrales para un determinado nivel de rendimiento relativo son mayores, en especial bajo siembra directa debido al fenómeno de estratificación. Para calcular la cantidad de P expresada en kg P/ha el dato del laboratorio expresado en ppm se multiplica por el valor A.

Así por ejemplo en un suelo de una DA=1,2 g/cm³:

10 ppm P=10 g P/t suelo x 2400 t suelo/ha=24000 g P/ha=24 kg P/ha.

Entonces si conocemos el valor de P de nuestro suelo y nos encontramos por debajo del umbral crítico, es posible calcular la dosis necesaria para alcanzar dicho valor:

P umbral (ppm)–P análisis (ppm)=P fertilizante (ppm)

P fertilizante (kg/ha)=P fertilizante (ppm) x valor A [4]

Sin embargo, no todo el P que aplicamos se encontrará disponible para el cultivo. Es por ello que debe calcularse un factor de corrección. Este factor de corrección (b) en los suelos arenosos (<15% de arcilla) depende fundamentalmente de la cantidad de P disponible

(Pd) presente en el suelo y puede calcularse utilizando la siguiente ecuación:

Coeficiente $b=0,52 + 0,0124 Pd$ si $Pd < 15$; si $Pd > 15$ entonces $b=0,7$ [5]

Entonces, una vez calculado el coeficiente b y reescribiendo las Ecuaciones 4 y 5, obtenemos la Ecuación 6:

P fertilizante (kg/ha) = P fertilizante (ppm) / coeficiente b x valor A [6]

Así por ejemplo si el análisis de suelo arrojó un valor de $Pd=10$ ppm y quiero alcanzar un umbral crítico de 15 ppm ya que voy a sembrar maíz en un suelo arenoso ($Arena > 80\% \rightarrow DA=1,4$) entonces:

Valor A = 2800 t/ha

P fertilizante (ppm) = 15 ppm - 10 ppm = 5 ppm = 5 g/t suelo

Coeficiente $b=0,52 + 0,0124 ppm - 1 \times 10 ppm = 0,644$

P fertilizante (kg/ha) = 5 g/t suelo / 0,644 x 2800 t/ha = 21,7 kg P/ha

6. Bibliografía

- Azcárate, P.; N. Kloster; A. Quiroga y A. Bono. 2007. Manejo de unidades. En: Quiroga, A. y A. Bono (Ed.), Manual de Fertilidad y evaluación de suelos. Publicación Técnica 71, INTA Anguil. 96–104 pp.
- Bono, A. y R. Álvarez. 2007. Estimación de nitratos en profundidad en suelos de la región semiárida y subhúmeda pampeana. Informaciones agronómicas 33: 25–26.
- García, F.O.; L.I. Picone y A. Berardo. 2006. Fósforo. Pp 99–121. En H.E. Echeverría y F. García (Ed.), Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires. 525 pp.
- Kirby, J.; R. Kingham y M. Cortes. 2001. Texture, density and hydraulic conductivity of some soils in San Luis province, Argentina. Ci. Suelo (Argentina) 19: 20–29.
- Rubio, G.; F. Gutiérrez Boem y M. Cabello. 2004. ¿Cuánto fósforo hay que aplicar para alcanzar el umbral crítico de fósforo disponible en el suelo? I. Cálculo a partir de propiedades básicas de suelo. Informaciones agronómicas 23: 5–8.

Ciclo del agua en San Luis

Claudio Alejandro Saenz y Juan Cruz Colazo
EEA INTA San Luis

1. Régimen de precipitaciones

La provincia de San Luis se localiza en la región semiárida y árida de la República Argentina. El régimen de precipitaciones varía desde los 700 mm anuales en el este hasta 250 mm en el oeste (Figura 1). La franja este de la provincia pertenece a la región semiárida pampeana, presenta déficit hídrico para la producción agrícola durante todo el año con precipitaciones que van desde 700 mm a 500 mm en el oeste de esta región (Saenz, 2009). Es una región mixta donde se realiza agricultura extensiva, basada en cultivos estivales en secano con una gran inestabilidad de rendimientos debido a la variabilidad de las lluvias.

Durante las últimas décadas se produjeron cambios climáticos caracterizados por un incremento en las precipitaciones entre octubre y marzo, una disminución de la temperatura máxima y la radiación solar, y un incremento de la temperatura mínima durante la mayor parte del año (Magrín et al., 2005). Estos cambios, sumados a una mejora en la eficiencia en el uso del agua por la adopción del sistema de siembra directa, contribuyeron a incrementar el rendimiento de los cultivos de verano y por ende al avance de la frontera agrícola hacia el oeste.

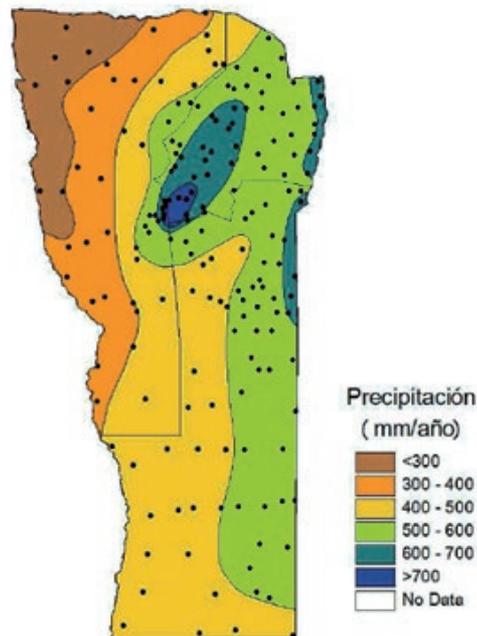


Figura 1. Precipitaciones media anual según modelo de interpolación desarrollado por BRS (2000). Puntos=estaciones meteorológicas. Tomado de Colazo (2013).

En la región las precipitaciones se concentran desde fines de primavera hasta comienzos de otoño y los inviernos son extremadamente secos (Orta, 2006), por lo que en la agricultura de secano predominan los cultivos estivales. Esta concentración de las precipitaciones en verano tiende a acentuarse hacia el norte como lo demuestra la Figura 2.

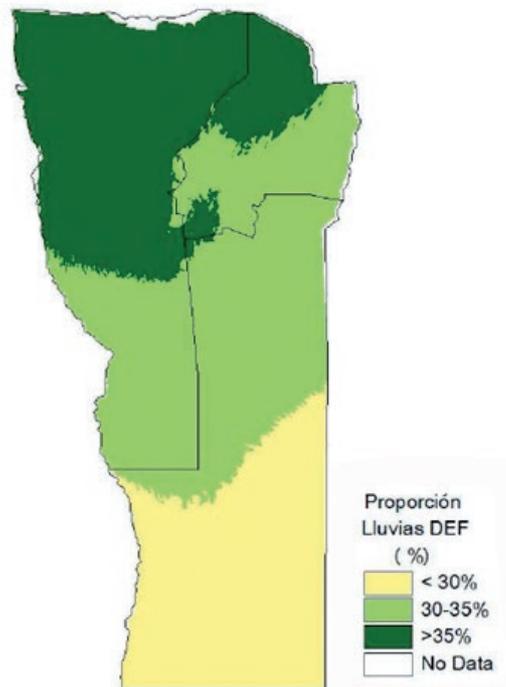


Figura 2: Proporción de las lluvias ocurridas durante el período diciembre–febrero (DEF) en relación con la precipitación anual. Tomado de Colazo (2013) según Hijmans et al. (2005).

Mediante la utilización de modelos climáticos y escenarios de emisión de dióxido de carbono se predice un pequeño incremento de las precipitaciones durante el período 2011–2030, como se muestra en Figura 3 a) (Barros et al., 2010), esta tendencia continuaría durante el período 2071–2100, mostrando una tendencia anual positiva, con un incremento en las precipitaciones estivales en toda la provincia y una disminución de las precipitaciones invernales en el norte de la provincia, Figura 3 b) (Pizarro et al., 2013).

2. Precipitaciones, evapotranspiración y balance hídrico

Las precipitaciones en San Luis son muy variables entre años y se concentran entre octubre y abril, en toda la provincia se produce déficit hídrico durante todo el año.

A continuación se presentan datos climáticos de Villa Mercedes como referente del centro de la provincia y del Consorcio de Riego de Quines–Candelaria (Bidoglia, 2013) como referente de la Llanura Norte. En Tabla 1 se presentan las precipitaciones mensuales para los últimos 40 años en Villa Mercedes, mientras que en la Tabla 2, las precipitaciones mensuales por ciclo agrícola para el semestre húmedo desde 1972-1973 a 2011-2012.

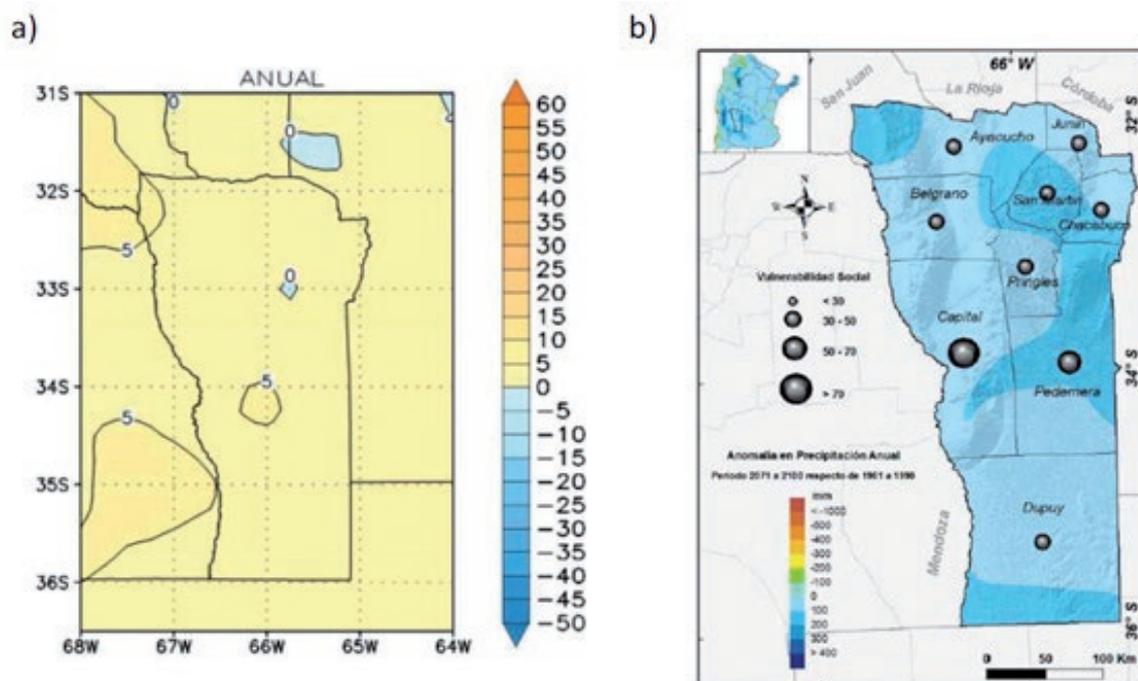


Figura 3. Estimaciones futuras de precipitaciones: a) cambios (%) en la precipitación media anual para el escenario de emisiones A1B para el período 2011–2030 con relación al período 1980-99, Barros et al. (2010), b) anomalía de precipitación anual del período 2071–2100 con respecto al período 1961–1999, Pizarro et al. (2013). Adaptados por Colazo (2013).

Tabla 1. Precipitaciones mensuales en Villa Mercedes (1973-2012). D.E.=Desvío Estándar.

Mes	Media	D.E.	Mediana	Mínimo	Máximo
Enero	113,53	48,73	110,35	28,50	262,30
Febrero	98,51	57,17	83,95	18,90	277,90
Marzo	88,58	53,60	85,05	12,40	261,00
Abril	54,23	42,93	45,15	0,00	153,80
Mayo	24,63	33,76	17,30	0,00	208,20
Junio	8,40	12,83	5,45	0,00	74,10
Julio	15,09	30,30	5,05	0,00	188,20
Agosto	13,35	16,38	6,50	0,00	65,20
Setiembre	32,39	33,34	18,40	0,00	154,00
Octubre	52,20	36,44	44,70	2,40	135,00
Noviembre	75,12	42,61	69,40	10,40	180,50
Diciembre	111,11	60,05	112,60	26,40	244,10
TOTAL	687,23	148,09	664,50	440,00	993,00

Tabla 2. Precipitaciones en Villa Mercedes durante el ciclo de los cultivos estivales (1972-73 a 2011-12). D.E.= Desvío Estándar.

Mes	Media	D.E.	Mediana	Mínimo	Máximo
Octubre	49,51	34,79	43,25	2,40	135,00
Noviembre	74,25	40,72	69,40	10,40	166,60
Diciembre	111,72	59,90	112,60	26,40	244,10
Enero	113,53	48,73	110,35	28,50	262,30
Febrero	98,51	57,17	83,95	18,90	277,90
Marzo	88,58	53,60	85,05	12,40	261,00
TOTAL	536,20	122,16	498,00	278,00	919,00

En Tabla 3 se presentan los valores de precipitaciones mensuales en Quines para la serie de años 1997–2012 (datos del Consorcio de Riego Quines-Candelaria).

Tabla 3. Precipitaciones en Quines (1997-2012). D.E.= Desvío Estándar

Mes	Media	D.E.	Mediana	Mínimo	Máximo
Enero	82,38	49,14	80,77	15,49	169,93
Febrero	82,56	43,2	83,28	13,99	156,46
Marzo	73,71	49,25	64,01	0,00	166,12
Abril	35,73	41,39	28,51	1,72	170,59
Mayo	17,68	22,59	7,11	0,51	75,69
Junio	3,41	5,76	2,21	0,00	22,61
Julio	2,72	3,88	1,02	0,00	14,22
Agosto	5,05	10,28	1,52	0,00	37,34
Setiembre	24,02	53,29	6,64	0,00	202,05
Octubre	36,95	24,46	33,53	1,02	82,04
Noviembre	66,11	26,67	55,43	32,94	112,33
Diciembre	81,69	45,28	77,72	5,59	143,51
TOTAL	503,61	156,19	489,23	290,28	778,23

Los valores de evapotranspiración potencial (Et0), precipitaciones y el balance hídrico medio diario para los diferentes meses en Villa Mercedes y Quines se presentan en Tabla 4 y 5 respectivamente (Registros de las estaciones automáticas de INTA EEA San Luis en Villa Mercedes y Consorcio de Riego de Quines-Candelaria). Los valores de Et0 se determinaron mediante el método de Penman–Monteith modificado por FAO.

Tabla 4. Evapotranspiración potencial, precipitaciones y balance hídrico diario en Villa Mercedes.
Período 1994-2012. D.E.= Desvío Estándar.

Mes	Variable	Media	D.E.	Mediana
Enero	Eto	6,51	0,96	6,60
	Precip.	3,82	1,28	3,70
	Bal. Hid.	-2,69	1,84	-2,80
Febrero	Eto	5,84	0,99	5,80
	Precip.	3,55	1,89	3,00
	Bal. Hid.	-2,29	2,35	-2,00
Marzo	Eto	4,53	1,09	4,40
	Precip.	2,76	1,54	2,80
	Bal. Hid.	-1,77	2,10	-1,70
Abril	Eto	3,33	0,83	3,30
	Precip.	2,11	1,60	2,10
	Bal. Hid.	-1,22	2,12	-1,60
Mayo	Eto	2,28	0,66	2,20
	Precip.	0,98	1,47	0,60
	Bal. Hid.	-1,29	1,75	-1,70
Junio	Eto	1,87	0,52	1,90
	Precip.	0,15	0,16	0,10
	Bal. Hid.	-1,72	0,58	-1,70
Julio	Eto	2,22	0,61	2,20
	Precip.	0,34	0,43	0,10
	Bal. Hid.	-1,88	0,77	-1,80
Agosto	Eto	3,30	0,87	3,20
	Precip.	0,42	0,54	0,20
	Bal. Hid.	-2,88	1,23	-2,80
Septiembre	Eto	4,57	1,23	4,40
	Precip.	1,18	1,35	0,70
	Bal. Hid.	-3,39	2,30	-3,90
Octubre	Eto	5,31	1,24	5,00
	Precip.	1,80	1,29	1,70
	Bal. Hid.	-3,51	2,25	-3,60
Noviembre	Eto	6,41	0,97	6,40
	Precip.	2,65	1,59	2,40
	Bal. Hid.	-3,76	2,14	-4,00
Diciembre	Eto	7,02	0,99	7,10
	Precip.	3,67	2,33	2,70
	Bal. Hid.	-3,35	2,80	-3,20

Tabla 5. Evapotranspiración potencial, precipitaciones y balance hídrico diario en Quines. Período 1997-2012 (Consortio de Riego Quines – Candelaria). D.E.= Desvío Estándar.

Mes	Variable	Media	D.E.	Mediana
Enero	Eto	6,43	1,10	6,62
	Precip.	2,66	1,58	2,61
	Bal. Hid.	-3,78	2,37	-3,50
Febrero	Eto	5,30	1,31	5,54
	Precip.	2,95	1,54	2,98
	Bal. Hid.	-2,36	2,21	-2,73
Marzo	Eto	4,31	1,10	4,46
	Precip.	2,38	1,59	2,06
	Bal. Hid.	-1,93	2,08	-1,21
Abril	Eto	3,09	0,79	3,21
	Precip.	1,19	1,38	0,95
	Bal. Hid.	-1,90	1,62	-2,32
Mayo	Eto	2,12	0,80	2,29
	Precip.	0,57	0,73	0,23
	Bal. Hid.	-1,55	1,23	-1,69
Junio	Eto	1,88	0,53	1,97
	Precip.	0,11	0,19	0,07
	Bal. Hid.	-1,77	0,57	-1,88
Julio	Eto	2,46	0,40	2,46
	Precip.	0,09	0,13	0,03
	Bal. Hid.	-2,43	0,47	-2,43
Agosto	Eto	3,34	0,47	3,26
	Precip.	0,16	0,33	0,05
	Bal. Hid.	-3,18	0,57	-3,24
Septiembre	Eto	4,62	0,85	4,37
	Precip.	0,80	1,78	0,23
	Bal. Hid.	-3,82	2,21	-4,24
Octubre	Eto	5,92	1,36	5,78
	Precip.	1,19	0,79	1,08
	Bal. Hid.	-4,73	1,93	-4,84
Noviembre	Eto	6,75	1,54	6,67
	Precip.	2,20	0,89	1,85
	Bal. Hid.	-4,54	1,75	-4,55
Diciembre	Eto	6,61	1,37	6,67
	Precip.	2,64	1,46	2,51
	Bal. Hid.	-3,98	1,87	-3,89

3. Variabilidad temporal de las precipitaciones

Los trabajos que muestran las tendencias sobre precipitaciones en San Luis son extensos. Las precipitaciones en las regiones semiáridas son muy variables. Esta variabilidad puede ser estudiada en el largo, mediano y corto plazo (Figura 4). Algunos de los trabajos sobre variabilidad en el largo plazo han encontrado un incremento lineal de las precipitaciones en zonas como Villa Mercedes y San Luis (Echeverría y Kall, 1990; Bertón y Echeverría,

1999; Veneciano et al., 2000). Estos incrementos tomando los últimos 100 años serían de aproximadamente 1-2 mm año⁻¹.

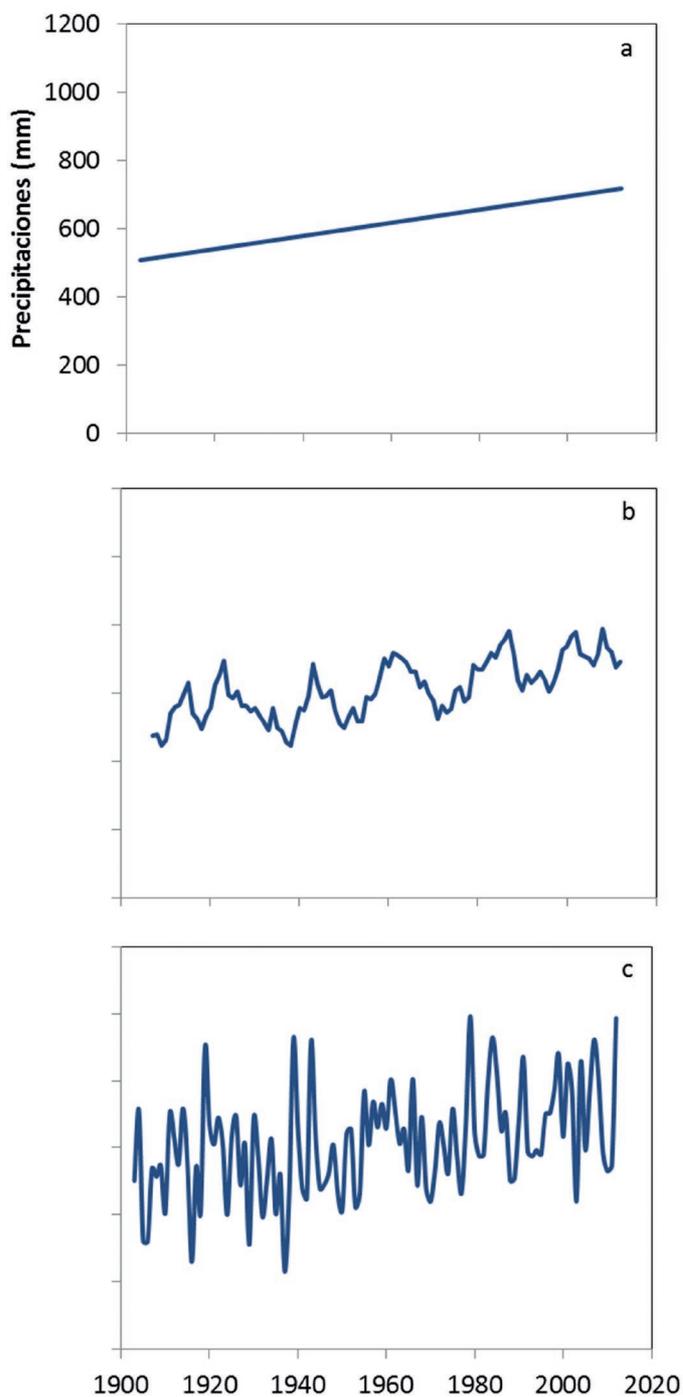


Figura 4. Precipitaciones (1903-2012) en Villa Mercedes: a) tendencia lineal, b) promedio móvil cada 5 años, c) precipitaciones anuales.

Este crecimiento de las precipitaciones se pone de manifiesto ya que la media de los últimos cincuenta años es superior a la media de los últimos cien años (Veneciano et al., 2000; Larruse et al., 2012). El análisis en el mediano plazo muestra la ocurrencia de ciclos

secos y húmedos. En general, durante la primera mitad del siglo XX predominan los ciclos secos con eventos de sequía durante los años 1930 y 1950 (Tripaldi et al., 2013). Por el otro lado, a partir de 1970 y especialmente durante 1980 se produjo una mayor predisposición a ciclos húmedos (Galván y Collado, 2009). Por último, la variabilidad interanual explica la mayor proporción de la variabilidad total, presentando un coeficiente de variación del 25%.

3.1. Probabilidad asociada a la ocurrencia de precipitaciones

La finalidad de la determinación de probabilidades de lluvia es conocer la posibilidad de recibir cierta cantidad de precipitaciones dentro de un período de tiempo determinado. Las probabilidades son extremadamente importantes en cualquier planificación agrícola. Un uso importante que se le hace a esta información es la determinación del grado relativo de éxito de los cultivos.

Para conocer la probabilidad de excedencia se debe ajustar un registro largo de precipitaciones (>30 años) a una distribución teórica de probabilidad. La distribución teórica más utilizada para el estudio de las precipitaciones es la distribución gamma. Una vez ajustado los valores se pueden construir tablas o figuras que permiten conocer la probabilidad asociada a la ocurrencia de excedencia de un determinado valor de precipitaciones. La Figura 5 muestra la distribución acumulada de precipitaciones (1981-2012) para Villa Mercedes para el período comprendido entre los meses de diciembre a marzo, período comprendido generalmente por los cultivos estivales. Se observa que la probabilidad de que precipiten más de 200 mm es del 99% (prácticamente todos los años), más de 300 mm del 80%, más de 400 mm del 30%.

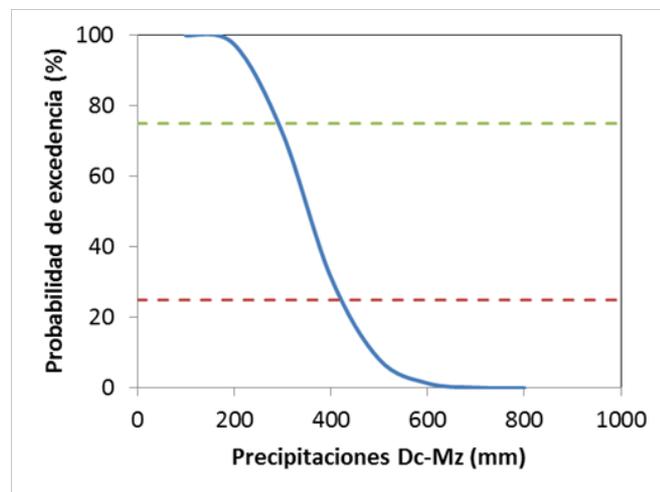


Figura 5. Probabilidad de excedencia de precipitaciones para el período comprendido entre diciembre y marzo (Precipitaciones Dc-Mz) para Villa Mercedes.

Teniendo en cuenta la eficiencia en el uso del agua de los cultivos estivales, un maíz de alto rendimiento en secano (8000 kg ha^{-1}) necesitaría entre 500–600 mm, por lo que la probabilidad de éxito de este cultivo determinado por las precipitaciones es del 10%. Conociendo el nivel de agua almacenado en el suelo y las precipitaciones en un determinado lugar, es posible estimar la probabilidad de ocurrencia de diferentes niveles de oferta de agua, lo que permite manejar el riesgo asociado al factor hídrico, y de esta manera decidir los niveles tecnológicos con menor incertidumbre. Así por ejemplo, si contamos con 100 mm en el suelo, la probabilidad de éxito asociada al agua aumenta al 30%, que es la probabilidad de que precipiten más de 400 mm.

3.2. Otros índices de variabilidad en las precipitaciones

El ENOS (El Niño y La Oscilación del Sur) es un fenómeno natural que influye en la variabilidad climática. Durante este fenómeno la temperatura en una región particular del océano Pacífico ecuatorial presenta desviaciones de $\pm 0,5$ °C con respecto a la media. Cuando la temperatura es más caliente, se denomina a la fase “El Niño”, mientras que cuando es más fría “La Niña”. Entre estas fases existe una tercera que se denomina neutral. Los ciclos entre fases consecutivas son irregulares, pero típicamente ocurren cada 3–7 años (Trebergh, 1998).

En la región central argentina El Niño está asociado a un incremento de las precipitaciones, mientras que La Niña a una disminución. Estos cambios son producidos en las precipitaciones de finales de primavera y principios de verano, lo que implica mejores condiciones para los cultivos de verano (Heinzenketch, 2011).

La Figura 6 muestra la distribución de las precipitaciones durante el trimestre diciembre–febrero para las dos fases extremas del ENOS. Se observa que en los años con fase niña los valores mínimos son muchos más bajos que en durante la fase niño.

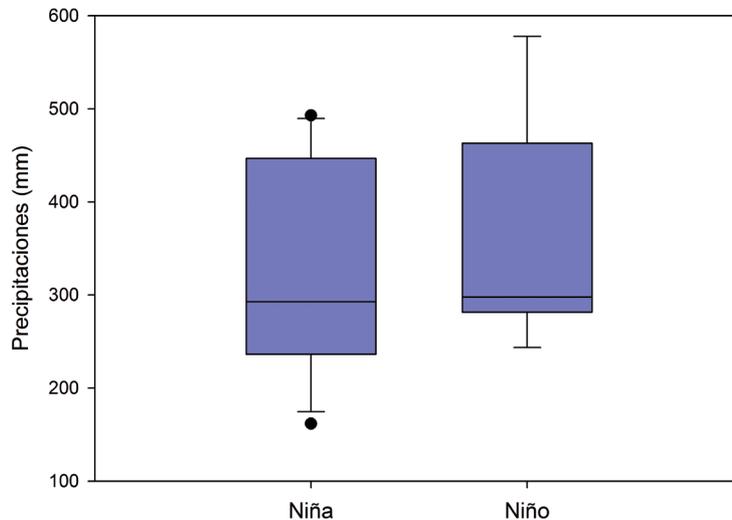


Figura 6. Gráfico box-plot para las precipitaciones anuales (1950-2010) para Villa Mercedes según años “Niña” y “Niño”. Los años fueron clasificados según Nun (2014) en los últimos 30 años.

Estos mayores valores de precipitaciones se asociaron a mayores niveles de rendimiento de maíz en el departamento General Pedernera (Figura 7). En términos medios existió una diferencia de 40 mm en este período.

En la actualidad existen modelos que intentan determinar la probabilidad de ocurrencia de las tres categorías del ENOS. Estas herramientas combinadas con la probabilidad de agua disponible me permiten disminuir la incertidumbre relacionada con el éxito de cultivos agrícolas.

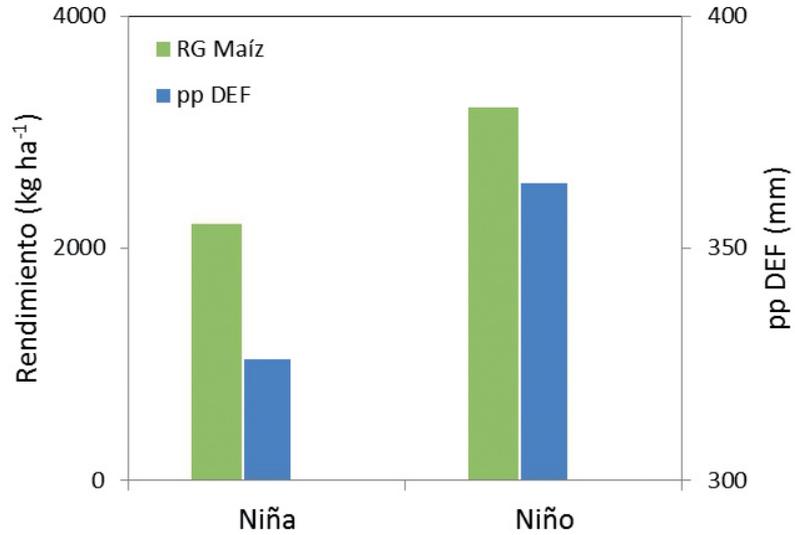


Figura 7. Precipitaciones medias durante el período diciembre–febrero (pp DEF) en Villa Mercedes y rendimiento medio de maíz en el departamento General Pedernera durante eventos considerados como “Niña” y “Niño” según Nun (2014) en los últimos 30 años.

4. Recursos hídricos superficiales

En la provincia existen siete cuencas principales de drenaje superficial, Ceci y Coronado (1981). La Figura 8 muestra las cuencas de agua superficiales, cuyos límites están formados por las divisorias de aguas (BRS, 2000). Los desagües naturales de estas cuencas son endorreicos a excepción de la cuenca del Desaguadero que esporádicamente desagua al mar a través del río Colorado.

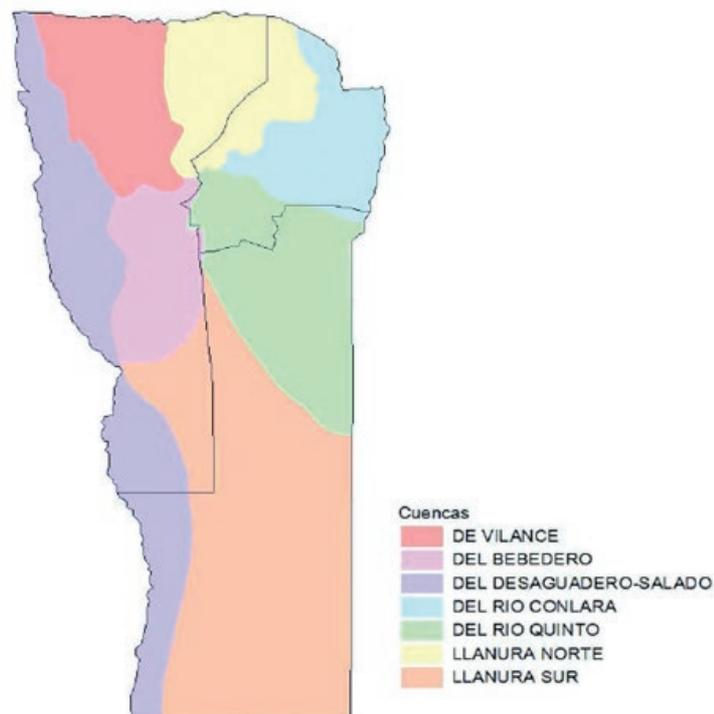


Figura 8. Cuencas superficiales de la provincia de San Luis. Tomado de BRS (2000).

El caudal medio total de los ríos de la provincia es $14,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, con un derrame anual próximo a los 450 hm^3 (FUNIF, 1999). Del caudal evaluado para todo el sistema hidrográfico provincial con posibilidades de agua para riego: los ríos Quinto, Conlara y Quines representan el 68% del total, con caudales medios de $5,9$; $2,1$ y $1,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ respectivamente (no se tiene en cuenta el río Desaguadero porque no es apto para riego). El resto de los ríos como Luján y San Francisco y arroyos totalizan $4,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (FUNIF, 1999).

Los cauces superficiales son regulados mediante embalses y diques niveladores, la capacidad total de embalse existente se estima en 445 hm^3 , con un índice de captación de 99%, de acuerdo a datos de San Luis Agua (2013).

5. Recursos hídricos subterráneos

En cuanto a los recursos hídricos subterráneos, el Gobierno de San Luis realizó estudios a fin de determinar las áreas prioritarias a desarrollar mediante riego con agua subterránea. Concluyendo que de acuerdo a las características del agua subterránea, suelo y clima, es factible desarrollar esta actividad en los sectores que se presentan como: apto y apto con limitaciones menores, en verde en Figura 9 (BRS, 2000).

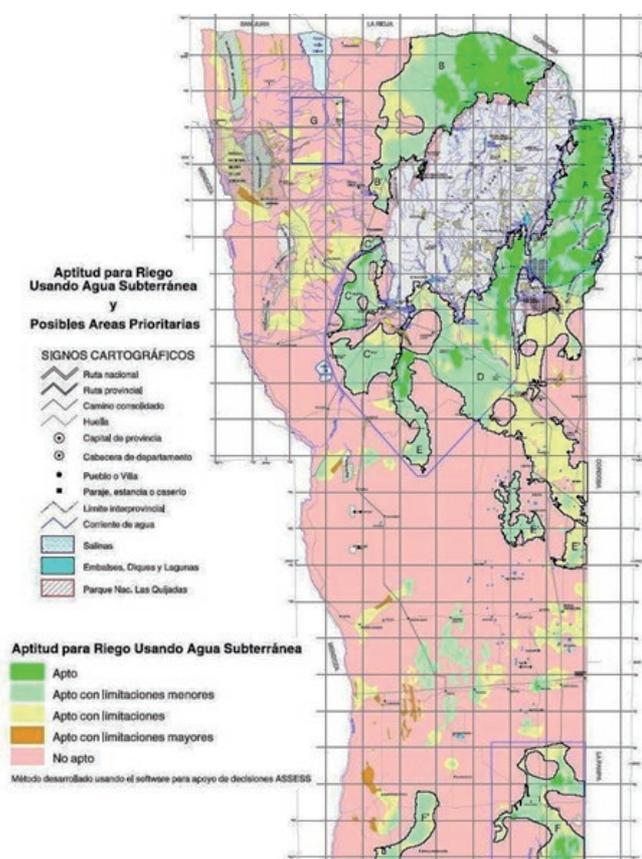


Figura 9. Áreas de estudio prioritarias del proyecto de Recursos Hidrológicos Subterráneos de San Luis. Tomado de BRS (2000).

Como la sobrexplotación del agua subterránea supone una grave amenaza para el medio ambiente, la salud y la seguridad alimentaria (Santos Da Silva, 2007), la provincia de San Luis ha avanzado en el conocimiento de este recurso mediante el Estudio Hidrogeológico de la Llanura Norte de la provincia, con el objetivo de conocer el sistema acuífero subterráneo

y determinar el grado de sustentabilidad de su actual explotación. Se desarrolló y calibró un modelo matemático que permitió determinar su funcionamiento (Bucich et al., 2009).

6. Empleos del recurso

Si bien el principal consumidor de agua dulce es el riego agrícola en la provincia de San Luis, el agua de los embalses abastece además para consumo humano, ganadero e industrial. Mediante numerosos acueductos a presión y canales a cielo abierto el agua es distribuida en regiones que no cuentan con agua subterránea o esta es de mala calidad, principalmente en el oeste provincial.

Los acueductos de la provincia cubren una superficie de 1599000 ha (Poggi, 2012). La carga bovina media del área cubierta por los acueductos es de 0,1 cab ha⁻¹ (Rossanigo et al., 2009) con un consumo de agua medio anual de 40 L cab⁻¹ día⁻¹ (Sager, 2000). Esto permite estimar un consumo de agua anual de 2,3 hm³.

En cuanto a la demanda urbana de agua, no se cuenta con datos de toda la provincia, pero las dos ciudades más importantes de la provincia, San Luis y Villa Mercedes, tienen un consumo de 430 y 450 L hab⁻¹ día⁻¹ respectivamente (Woscoboinik, 2009). Se abastecen principalmente de agua superficial y sus sistemas de distribución de agua potable sirven al 74% de la población provincial, 270837 habitantes (DPEyC-San Luis, 2011). Del volumen de agua que ingresa a los sistemas urbanos, el 60-85% retorna por la red cloacal con una carga importante de nutrientes (20-85 mg L⁻¹ de nitrógeno total y 4-15 mg L⁻¹ de fósforo total) (Campaña, 2007) lo que representa un recurso importante. En el caso de la ciudad de San Luis se está utilizando el agua residual tratada para un sistema productivo con resultados promisorios.

Al ser el agua un recurso insustituible para la vida, no se debe utilizar el caudal total de un río, sino que se debe dejar fluir un caudal ecológico que permita la subsistencia de los ecosistemas acuáticos, de acuerdo a Tennant (1976), ese caudal como mínimo es el 10% del módulo del cauce.

6.1. Demanda de agua para riego

En Argentina y en la mayor parte del mundo se destina a riego el 70% del total de agua consumida (Saenz, 2011). La agricultura bajo riego, el mayor usuario de agua dulce del mundo, enfrenta un doble desafío, el ser más eficiente y productivo por volumen de agua utilizado ante una creciente demanda de agua y energía para otros usos (Prieto et al., 2010).

En San Luis las áreas tradicionales de riego superficial se encuentran en los faldeos de las sierras de San Luis y sobre las márgenes del río Quinto, principal desagüe de la provincia. En 1998 se regaban 21090 ha mediante riego por superficie en la provincia (FUNIF, 1999), considerando una demanda media de 10000 m³ ha⁻¹ año⁻¹, significa una demanda del orden de los 211 hm³ de agua por año. En 2005 los censos de cultivos registraron 17000 ha bajo riego por superficie, cuya composición por tipo de cultivo se presenta en Tabla 6 (Montiel, 2005).

A partir de la década del 80 comenzaron a ingresar al país sistemas de riego presurizado que permiten duplicar el rendimiento de los principales cereales y oleaginosas en el área central del país (Dardanelli, 1994; Salinas, 2006). La provincia de San Luis no se diferencia de lo que ocurre a nivel nacional, existe una paulatina disminución de la superficie bajo riego gravitacional en las áreas tradicionales, y paralelamente un desarrollo importante del riego complementario en zonas de secano.

Tabla 6. Superficie bajo riego con agua superficial (ha) en la provincia de San Luis por cuenca y tipo de cultivo. (Montiel, 2005).

Cultivos	Valle del Conlara	Llanura Norte	Villa Mercedes	Total	%
Cereales	2.307	1.408	3.550	7.265	43
Oleaginosas	175	528	4.115	4.818	28
Forrajeras	1.037	1.169	469	2.675	16
Hortícolas	474	813	57	1.344	8
Frutícolas	41	213	20	274	2
Industriales		580		580	3
Total	4.034	4.711	8.211	16.956	100

El incremento en la superficie de estos sistemas también se explica por la mayor eficiencia en el uso del agua. Los sistemas de riego tradicionales por gravedad tienen una eficiencia global de 40%, mientras que en los sistemas de riego por aspersión mediante pivote central esta eficiencia global es de 70% (Seckler, 1996).

7. Superficie bajo riego en la provincia

En la provincia de San Luis la superficie agrícola total es de 452000 ha (RIAN San Luis–MAGyP, 2013) donde los principales cultivos en secano son maíz, soja y girasol. Mediante imágenes satelitales (Lansat TM) se ha determinado la superficie bajo riego de la provincia (Figura 10), dando como resultado que se riegan 78613 ha. De estas, 56437 ha corres-

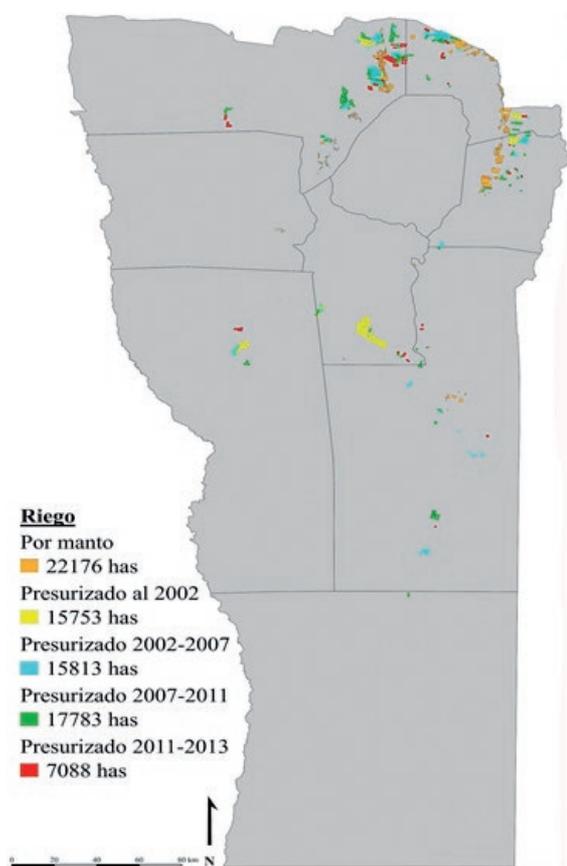


Figura 10. Evolución de la superficie bajo riego en la provincia de San Luis (Martini y Saenz, 2013).

ponden a sistemas presurizados, principalmente pivote central, y se mantiene la superficie bajo riego de los sistemas tradicionales en 22176 ha. En el caso de riego por superficie, la estimación de la superficie mediante imágenes satelitales puede tener errores debido a que existen lotes en situación de abandono o salinizados.

En la Figura 11 se presenta la evolución de la superficie bajo riego presurizado en la provincia de San Luis desde el año 2002 a 2013.

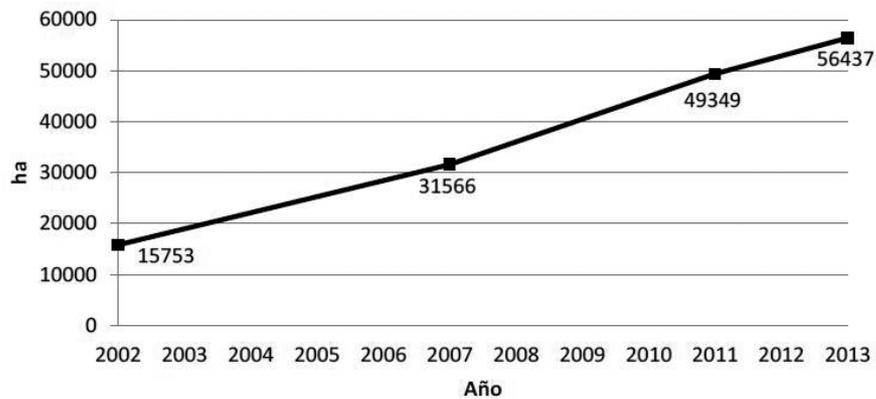


Figura 11. Evolución de la superficie bajo riego presurizado en la provincia de San Luis (Martini y Saenz, 2013).

7. Ciclo del agua en la agricultura



Figura 12. Ciclo del agua en agricultura.

En la Figura 12 se muestra el ciclo del agua de un sistema agrícola. El agua ingresa como agua de precipitaciones o riego, parte de esta se puede perder por escorrentía superficial y parte ingresa al suelo donde se almacena. Cuando el agua que ingresa al suelo, supera a la capacidad de almacenaje de este se pierde por percolación profunda.

El agua que queda almacenada en el suelo vuelve a la atmósfera a través de la evaporación desde el suelo y de la transpiración de la vegetación. Este último proceso está íntimamente relacionado al rendimiento que se obtendrá del cultivo, por lo que el manejo agronómico que se realice en agricultura, tanto de secano como bajo riego, debe tener como objetivo que el agua disponible para la producción salga del sistema mediante la transpiración del cultivo.

7.1. Escorrentía superficial

Cuando se produce una precipitación o un riego, el agua se infiltra y almacena en el suelo a una velocidad dada por la curva de infiltración característica del suelo, cuando la precipitación excede a la velocidad de infiltración parte del agua caída se pierde lateralmente por escurrimiento superficial. Este proceso es la principal causa de la erosión hídrica.

El porcentaje de agua que se pierde depende de diversos factores inherentes al suelo y a la precipitación entre los que podemos mencionar:

Textura y estructura del suelo, compactación, contenido hídrico inicial, topografía (pendiente y longitud de esta), el grado de cobertura del suelo y la magnitud e intensidad de la precipitación.

En agricultura las herramientas que disponemos para mitigar estas pérdidas de agua son: maximizar la cobertura con rastrojos mediante la siembra directa, anclar el rastrojo al suelo mediante cultivos de cobertura para que no sea arrastrado por la escorrentía, y mejorar la velocidad de infiltración de agua mediante la rotación de cultivos.

En el caso de zonas con pendientes importantes y suelos con velocidad de infiltración moderada, donde la escorrentía puede generar erosión hídrica, es conveniente realizar prácticas de manejo y conservación de suelos como curvas de nivel y diques con salida controlada. De modo que la mayor cantidad posible de agua de lluvia infiltre en el lote.

7.2. Influencia de napas freáticas

Cuando la napa freática se encuentra cercana a la superficie del suelo puede tener efectos positivos como aporte de agua a los cultivos o negativos como anegamiento o salinización.

La magnitud de estos efectos va a depender de la profundidad de la napa, de la calidad del agua freática y de la textura del suelo. Estas características van a definir el volumen de agua y sales que asciende por capilaridad hacia la superficie del suelo (Figura 13). Recíprocamente los cultivos afectan la profundidad y la composición química del agua freática por el agua y nutrientes que consumen de ella.

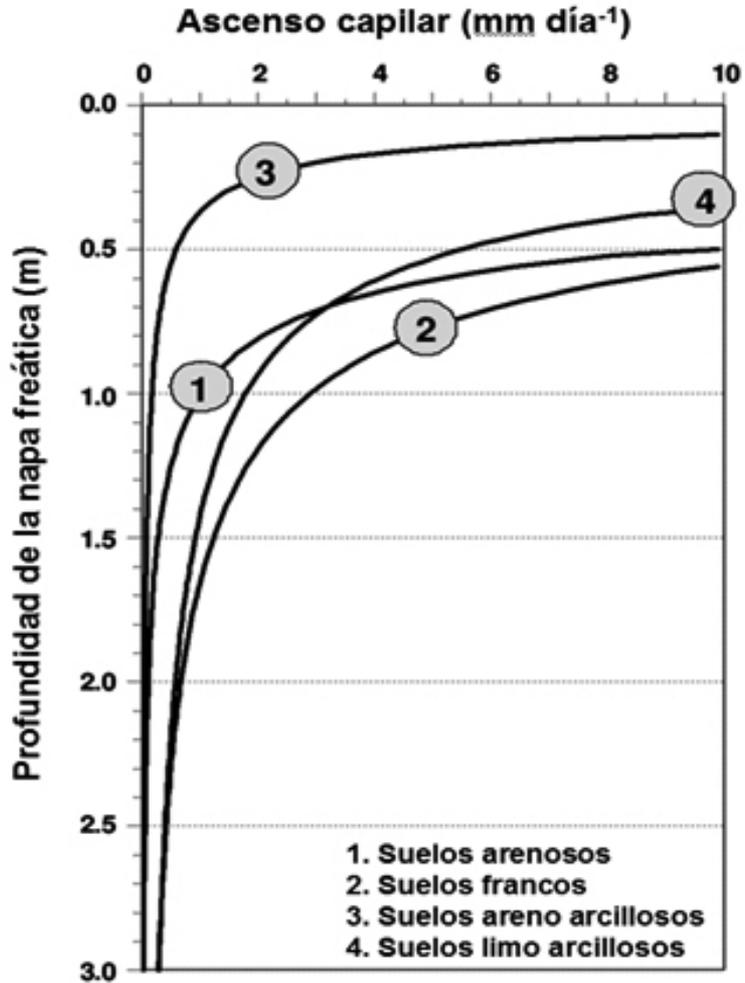


Figura 13. Ascenso capilar en función de la profundidad de la napa y de la textura del suelo (FAO, 2012).

En el área central de la región pampeana, el rango óptimo de profundidad del agua freática en que los cultivos maximizan sus rendimientos en secano es de 1,40-2,45 m para maíz, 1,20-2,20 m en soja y 0,70-1,65 m para trigo (Figura 14). Cuando la freática es menos profunda que los niveles óptimos, el rendimiento de los cultivos declina a razón de 500 kg ha⁻¹ cada 10 cm de incremento del nivel freático, esto es producto de la salinización, el anegamiento y la anoxia que sufre el sistema radicular. Cuando la freática se encuentra por debajo de estos rangos el rendimiento de los cultivos declina por un menor aporte de agua desde esta (Nosetto et al., 2009).

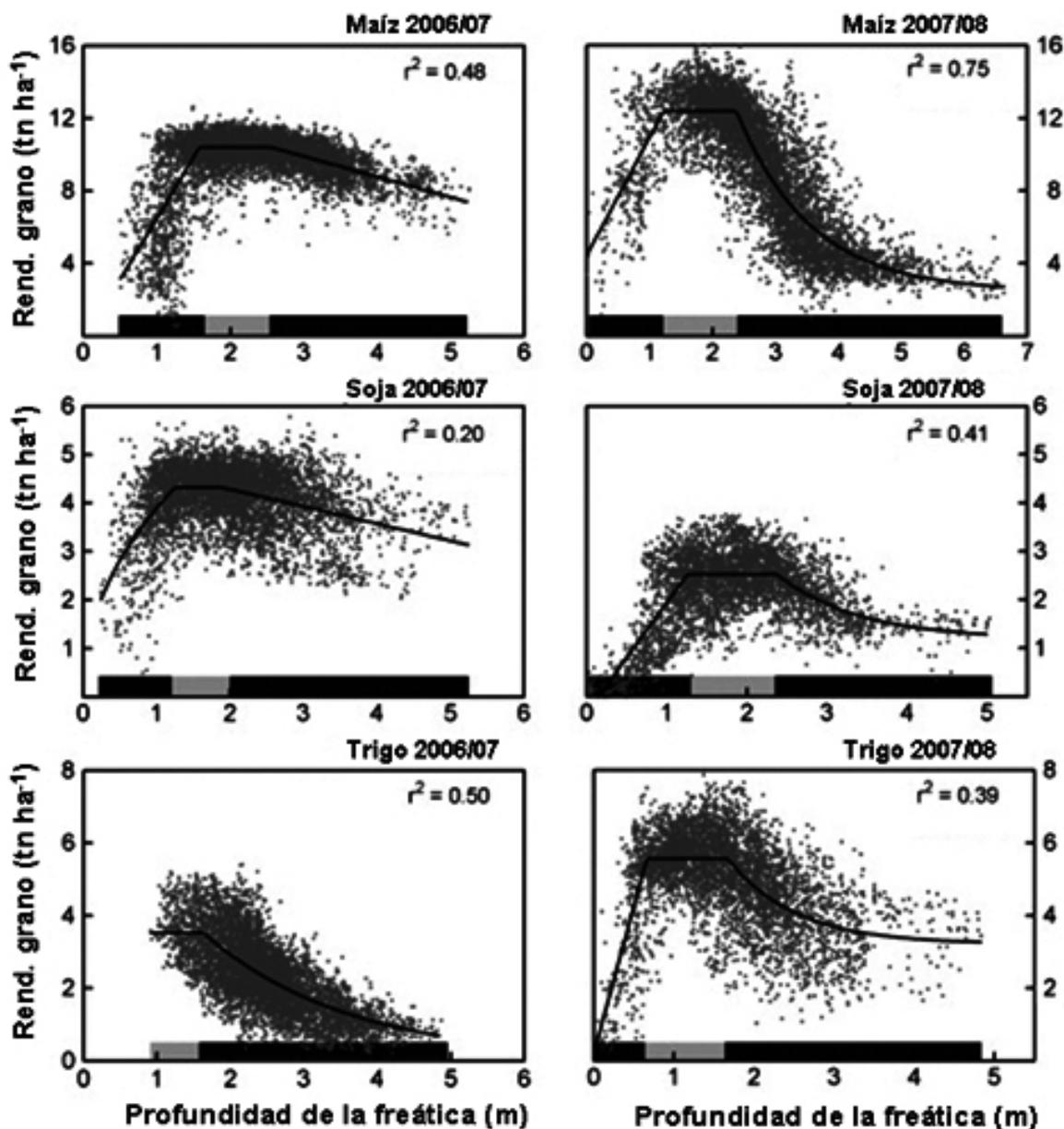


Figura 14. Rendimiento de grano en función de la profundidad de hasta la napa freática (Nosetto et al., 2009).

Los cultivos incrementan el consumo de agua freática a medida que avanzan en su ciclo, lo que genera una disminución del nivel freático y un incremento de la conductividad eléctrica (CE) del agua 2,2 dS m⁻¹ respecto de 1,1 dS m⁻¹ en presiembra (Nosetto et al., 2009). La salinidad del agua freática es inversamente proporcional al aporte de agua que realiza al cultivo, debido a que se incrementa el potencial osmótico de esta. En Figura 15 se presenta la relación entre profundidad del agua freática y la salinidad del perfil del suelo.

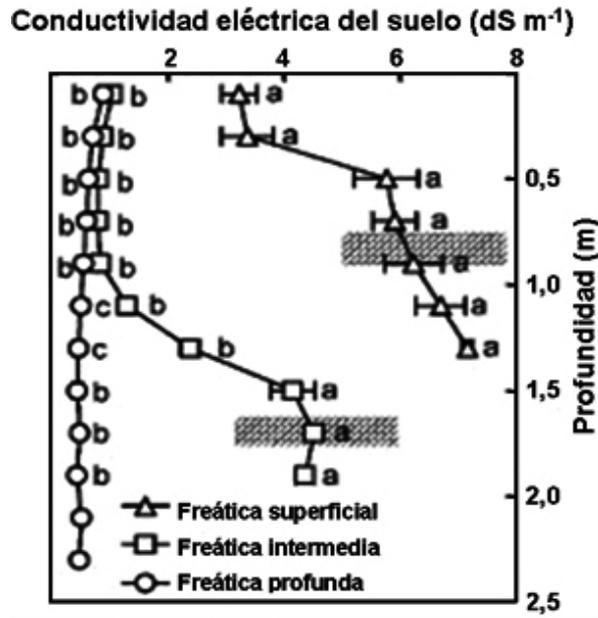


Figura 15. Conductividad eléctrica del perfil del suelo en función de la profundidad de la napa. Tomado de Nosetto et al. (2009).

Los sectores con posibilidades de aporte de agua desde la freática en la provincia de San Luis se presentan en negro en Figura 16.

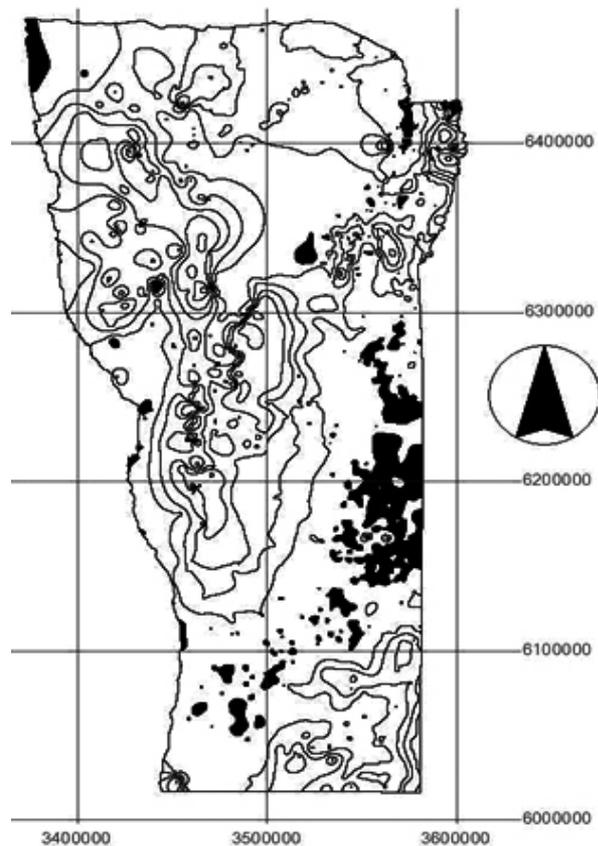


Figura 16. Isopropundidad del agua freática en la provincia de San Luis. En negro la profundidad es menor a 5 m. Adaptado por Colazo (2013) con datos de BRS (2000).

8. Bibliografía

- Barros, V.R.; M.N. Nuñez; I. Camilloni y S. Solman. 2010. Escenarios Climáticos de la provincia de San Luis. 58 pp.
- Bertón, J.A. y J.C. Echeverría. 1999. Cambio Climático global en San Luis: Régimen pluviométrico. En: Actas de las VII Jornadas Cuidemos Nuestro Mundo. UNSL, San Luis.
- Bidoglia, P. 2013. Datos climáticos de Quines. Consorcio de Riego Quines-Candelaria. 2 pp.
- BRS (Bureau of Rural Sciences). 2000. Evaluación de posibilidades físicas y económicas de riego con aguas subterráneas en la provincia de San Luis. 239 pp.
- Bucich, N.; R.N. Gianni; R.E. Guimaraes, V.H. Sánchez; J.J. Urnicia y P. Luna. 2009. Estudio hidrogeológico llanura norte, provincia de San Luis. Informe Técnico 277. Convenio con el Gobierno de la provincia de San Luis.
- Campaña H. 2007. Tratamiento de efluentes. UTN. Disponible en: http://www.frbb.utn.edu.ar/carreras/materias/ing_sanitaria/tema9resumen.pdf.
- Ceci, J.H. y M.D.C. Coronado. 1981. Recursos hídricos subterráneos. Pp 301–322. En: Geología y recursos naturales de la provincia de San Luis: Relatorio del VIII Congreso Argentino Geológico.
- Colazo, J.C. 2013. Recursos físicos y ambientales de los territorios de la provincia de San Luis. 23 pp. Documento base para la elaboración del plan tecnológico regional 2012–2019. INTA. Disponible en: <http://inta.gob.ar/documentos/recursos-fisicos-y-ambientales-de-los-territorios-de-la-provincia-de-san-luis>.
- Dardanelli, J. 1994. Perspectivas del riego suplementario en la región semiárida de Córdoba. Seminario Nacional Situación Actual y Perspectivas de las Áreas Regadas en Argentina. INCYTH–Gobierno de Tucumán. INTA Tucumán. Argentina.
- DPEyC-San Luis. 2011. Dirección Provincial de Estadística y censos. Disponible en: <http://www.estadistica.sanluis.gov.ar/estadisticaasp/Paginas/Pagina.asp?Paginald=79>
- Echeverría, J.C. y G.F. Kall. 1990. Las lluvias en Villa Mercedes (S.L.). Información Técnica 113. EEA INTA San Luis. 16 pp.
- FAO. 2012. Aquacrop. Disponible en: <http://www.fao.org/nr/water/docs/AquaCropV40Note.pdf>.
- FUNIF. 1999. Mapa Productivo provincial en base a Posibilidades de Inversión en el sector agropecuario. Subsecretaría de Producción y Desarrollo Agropecuario.
- Galván, M.J. y A.D. Collado. 2009. Escurrimientos hídricos superficiales en la Cuenca Hidrográfica de “El Morro”, provincia de San Luis. Información Técnica 175. EEA INTA San Luis. 62 pp.
- Heinzenknecht, G.M. 2011. Informe Final proyecto: Riesgo y Seguro Agropecuario. 54 pp.
- Hijmans, R.J.; S.E. Cameron; J.I. Parra; P.G. Jones y A. Jarvis. 2005. Very High resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 25:1965–1978.
- Larrusse, C.E.; E. Lentini y A. Castaño de Arce. 2012. Evolución de las precipitaciones en Villa Mercedes. Informe Técnico. 8 pp.
- Magrín, G.O.; M.I. Travasso; R.A. Díaz y R.O. Rodríguez. 2005. Change in climate and crop production during the 20th century in Argentina. *Clim. Change* 72 (1-2):229-249.
- Martini, J.P. y C.A. Saenz. 2013. Informe sobre evolución del área bajo riego en la provincia de San Luis. INTA EEA San Luis.
- Montiel, E. 2005. Censo de Cultivos bajo riego. Informe Técnico INTA EEA San Luis.
- Nosetto, M.D.; E.G. Jobbágy; R.B. Jackson y G.A. Sznaider. 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crops Res.* 113:138–148.
- Orta, J.O. 2006. Aplicación del Modelo CERES-Maize como Herramienta para Evaluar Estrategias de Manejo del Cultivo de Maíz Bajo Riego y secano, en el Área de Villa Mercedes (San Luis). Tesis para optar al grado académico de Magíster en Ciencias agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Agropecuarias.
- Prieto, D.; E. Martellotto; A. Salinas; G. Angella; J.P. Giubergia; M. Boccardo; E. Lovera; E. Rampoldi; C. Alvarez; M. Basanta; R. Haro y I. Severina. 2010. 2.o Reunión Inter-

- nacional de Riego. Sistemas y metodología para asesoramiento a regantes. INTA EEA Manfredi.
- Pizarro, M.J.; R. Mezher; P. Mercuri; A. Espíndola; M. Argerich; E. Fenoglio y N. Castillo-Marín. 2013. El caso de la provincia de San Luis. En: Tendencias de extremos climáticos en Argentina. Proyecto PNUD. SAYDS-INTA.
- Poggi, C. 2012. Plan Maestro del Agua de la Provincia de San Luis 2012–2025.
- RIAN San Luis–MAGyP, 2013. Informe técnico mensual digital. Disponible en: <http://inta.gob.ar/unidades/822000>
- Rossanigo, C.; A. Arano y G. Rodríguez Vazquez. 2009. Stock 2009 del Ganado Bovino de Carne. Información Técnica 174, INTA San Luis.
- San Luis Agua. 2013. Diques de la Provincia de San Luis. Disponible en: <http://www.san-luisagua.com.ar/SLAguaASP/paginas/pagina.asp?PaginalD=27>.
- Saenz CA. 2009. El riego complementario en relación a la agricultura en el este de San Luis. Pp 39-42. En: A. Quiroga; J. Casagrande y J.C. Colazo (Ed.), Aspectos de la evaluación y el manejo de los suelos en el este de San Luis. Información Técnica 173, INTA San Luis.
- Saenz, C.A. J.C. Colazo y E.O. Montiel. 2011. Disponibilidad de Recursos Hídricos y Potencial de Riego en la Provincia de San Luis. XXIII Congreso Nacional del Agua. Resistencia, Chaco 22 al 25 de junio de 2011. ISSN 1853-7685. Disponible en: <http://www.conagua2011.com.ar/dsite/actas/>.
- Sager, R.L. 2000. Agua para bebida de bovinos. Reedición Información Técnica 126, INTA San Luis.
- Salinas, A.; E. Martellotto; J.P. Giubergia; P. Salas; V. Capuchino; J. Pappalardo; E. Lovera y J. Gorgas. 2006. Riego Suplementario en Cultivos Extensivos en la Provincia de Córdoba Situación Actual. Proyecto Regional de Agricultura Sustentable e Impacto Ambiental INTA EEA Manfredi. Disponible en: <http://www.inta.gov.ar/manfredi/info/documentos/docsuelos/riegosuple1.htm>.
- Santos Da Silva, HB. 2007. Water Resources World-Wide Management Policy. The School of Business and Public Management IBI-Institute of Brazilian Business and Public Management Issues.
- Seckler, D. 1996. The New Era of Water Resources Management. Research Report 1. Colombo, Sry Lanka: International Irrigation Managements Institute (JIMI). ISBN: 92-9090-325-2.
- Tennant, D.L. 1976. Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources. Fisheries 1(4): 6-10.
- Trenberth, K.E. 1997. The definition of El Niño. Bulletin of the American Meteorological Society 78: 2771-2777.
- Tripaldi, A.; M.A. Zárate; S.L. Forman; T. Badge; M.E. Doyle y P. Ciccioli. 2013. Geological evidence for a drought episode in the western Pampas (Argentina, South America) during the early-mid 20th century. The Holocene 23(12): 1731–1746.
- Veneciano, J.H.; O.A. Terenti y M.E. Federigi. 2000. Villa Mercedes (San Luis): reseña climática del Siglo XX. INTA San Luis. Información Técnica 156, INTA San Luis.
- Woscoboinik, D. 2009. Consumo de agua por habitante en San Luis. Disponible en: <http://www.sanluis.gov.ar/SL/Paginas/NoticiaDetalle.asp?InfoPrensald=4707>.

2. Salinidad del agua de riego

La composición y concentración de sales en la solución del suelo puede afectar el crecimiento de las plantas debido a cambios en las propiedades del suelo y a los efectos de toxicidad y osmótico (Rhoades, 1972). El aporte de sales al perfil puede ocurrir a través del agua de riego o por ascenso freático de agua salina.

Los cultivos al extraer agua del suelo van concentrando las sales solubles presentes en el perfil hasta concentraciones que causan reducción de rendimientos por una menor disponibilidad de agua para las plantas. Esto se debe a un aumento del potencial osmótico de la solución del suelo.

Los efectos osmóticos conducen al concepto de sequía fisiológica producido por las sales del suelo, es decir que si el suelo es salino por más que contenga humedad, los cultivos no pueden extraerla. La succión osmótica de la solución del suelo está en relación con la velocidad con que las plantas absorben el agua y nutrientes, y por ende con el crecimiento y rendimiento de estas en ambientes salinos (Avellaneda et al., 2004).

Los cultivos tienen diferente tolerancia a las sales debido a la propiedad de efectuar un ajuste osmótico que les permite generar gradientes de potencial necesarios para extraer el agua en los suelos salinos (Bernstein, 1961; Richards, 1954; Rhoades, 1972).

El contenido de sales disueltas en el agua está directamente relacionado a la conductividad eléctrica (CE) de esta. La CE es la cantidad de corriente eléctrica transmitida por una solución salina en condiciones estándar, se incrementa al aumentar la concentración de sales en solución, lo cual simplifica la interpretación de las lecturas (U. S. Salinity Laboratory Staff, 1954). Actualmente la unidad de medición es el decisiemen por metro (dS m^{-1}) a 25 °C, aunque todavía es corriente la utilización de unidades de la CE como milimhos cm^{-1} (mmhos cm^{-1}) o micromhos cm^{-1} .

El mmhos cm^{-1} es utilizado para expresar el contenido salino de un suelo y es numéricamente igual a dS m^{-1} . La segunda, micromhos cm^{-1} , es una unidad muy común para el contenidos de sales del agua, ya que la mayoría de las utilizadas con fines de riego se encuentran por debajo o muy cerca de 1 dS m^{-1} o 1 mmhos cm^{-1} .

$1000 (\text{dS cm}^{-1})=1 (\text{dS m}^{-1})$.

La relación con los sólidos totales presentes en el agua es aproximadamente:

$1 \text{ mmhos cm}^{-1}=1 \text{ dS m}^{-1}=0,64 \text{ g L}^{-1}=640 \text{ mg L}^{-1}$.

Las clasificaciones de agua para riego más difundidas son el esquema propuesto por el laboratorio de salinidad de Riverside del USDA (Richard, 1954) y la clasificación de FAO (Ayers y Westcot, 1985). El esquema original de Riverside contemplaba cuatro categorías de peligrosidad de riesgo de salinización y sodicidad. La creciente expansión del riego en regiones más áridas donde fue desarrollada derivó en una modificación con mayor número de clases (Thorne y Peterson, 1954). Sin embargo, esta clasificación sigue siendo débil con respecto al peligro de sodio, que es más complejo de lo que plantea esta clasificación (Báez, 1999). La propuesta de FAO es menos restrictiva en cuanto al contenido salino; incorpora el concepto de interacción RAS-CE para evaluar el peligro de sodicidad y los métodos de riego en la evaluación de los problemas de toxicidad en aquellos iones que pueden ser absorbidos por las plantas a través de sus hojas (Prieto y Angueira, 1996). Ambas propuestas se presentan a continuación en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Clasificación de Riverside modificada por Thorne y Peterson

CE (dS cm ⁻¹)	Categoría	Clasificación
Hasta 250	C1	Salinidad baja
250 a 750	C2	Salinidad moderada
750 a 2250	C3	Salinidad mediana
2250 a 4000	C4	Salinidad alta
Mayor a 4000	C5	Salinidad muy alta

Tabla 2. Clasificación según FAO

CE (dS cm ⁻¹)	Categoría	Clasificación
Hasta 700	C1	Sin problemas
700 a 3000	C2	Problemas crecientes
Mayor de 3000	C3	Problemas serios

En el caso de utilizar agua con problemas de salinidad es necesario aplicar una lámina de riego excedente, dada por la relación de lavado (RL), que permita el lavado de sales en profundidad permitiendo mantener la rizósfera con una CE dentro de los parámetros admitidos por el cultivo.

2.1. Requerimientos de lavado

Para mantener el balance salino en el perfil del suelo, es necesario lavar las sales acumuladas en el perfil hacia estratos profundos utilizando una lámina de riego adicional denominada relación de lavado (RL). La magnitud de esta va a estar dada por la salinidad del agua de riego y del agua de drenaje que se requiera, que estará relacionada con la CE de la solución del suelo. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$RL = \frac{CE_{\text{agua}}}{(5 \times CE_e) - CE_{\text{agua}}}$$

RL=Requerimiento de lixiviación.

CE_{agua}=Conductividad eléctrica del agua de riego (dS m⁻¹).

CE_e=Conductividad eléctrica umbral del extracto de suelo saturado.

Para calcular la lámina a aplicar con el riego:

$$L_a = (1 + RL) \times L$$

L_a=Lámina de riego a aplicar incluida la RL.

L=Lámina de riego calculada en función de la evapotranspiración.

En el caso de que el agua de riego sea yesosa y/o bicarbonatadas calciomagnésicas deben tenerse en cuenta consideraciones especiales.

3. Sodicidad

Los constituyentes inorgánicos solubles en el agua de riego reaccionan con el suelo en forma iónica. Los principales cationes son calcio, magnesio y sodio, con pequeñas cantidades de potasio. Mientras que los principales aniones son carbonatos, bicarbonatos, sulfatos y cloruros, y en menor cantidad nitratos, fluoruros y boratos (Avellaneda et al., 2004). El uso continuo de agua con relativamente alta proporción de sodio respecto de calcio y magnesio puede producir un intercambio catiónico y transformar el suelo en sódico.

El peligro de producir sodicidad en el suelo está relacionado con la acumulación de sodio intercambiable en el perfil, lo que produce un deterioro de la estructura del suelo afectando su permeabilidad. Esto se debe a que el sodio hace flocular las partículas finas del suelo colmatando los microporos, generando una disminución importante de la velocidad de infiltración y anoxia con efectos negativos sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. Los riesgos de un agua para producir sodicidad en el suelo han sido expresados por diferentes índices, el más usado es la RAS propuesto por Richards (1954), que a pesar de ser empírico es ampliamente utilizado por su correlación con el PSI. El PSI se calcula como el cociente porcentual entre el sodio de intercambio y la capacidad de intercambio catiónico (CIC).

También se pueden producir problemas de toxicidad iónica por sodio que se manifiesta en forma de quemadura o necrosis a lo largo de los bordes de las hojas. Los síntomas comienzan en los bordes de las hojas más viejas y se intensifican avanzando en el área internerval hacia el centro de las hojas. Los cultivos presentan distintos niveles de tolerancia a la toxicidad por sodio (Ayers y Westcot, 1985).

3.1. RAS

La relación de absorción de sodio (RAS) nos da un indicio del porcentaje de sodio intercambiable al que tenderá un suelo en equilibrio con el agua de riego.

Se calcula mediante la fórmula:

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}$$

Dónde: Na, Ca y Mg corresponde a la concentración de estos cationes en el agua de riego en meq L⁻¹.

De acuerdo a Riverside modificado por Thorne y Peterson a una misma RAS aumenta la peligrosidad sódica a medida que se incrementa la salinidad del agua Figura 2.

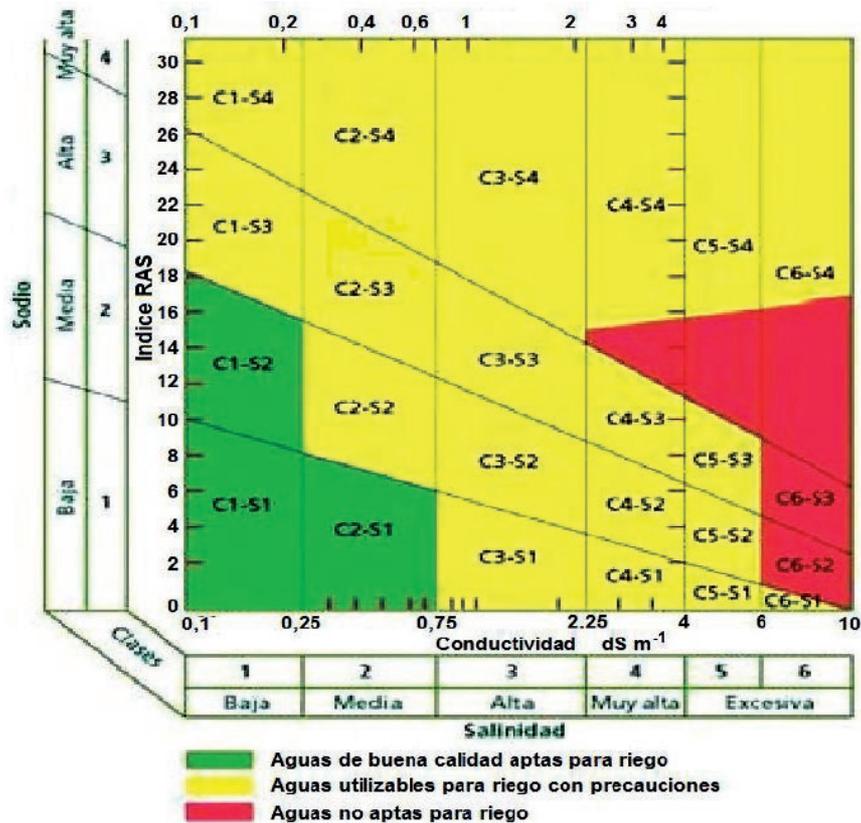


Figura 2. Clasificación de aguas de riego de acuerdo a Riverside modificada por Thorne y Peterson (1954).

Mediante la RAS se puede clasificar al agua en cuatro clases:

S1-Baja peligrosidad sódica

Puede usarse en casi todos los suelos sin peligro de que el nivel de sodio intercambiable suba demasiado. Sin embargo plantas muy sensibles al sodio pueden presentar problemas.

S2-Mediana peligrosidad sódica

En suelos de textura fina y especialmente en condiciones de drenaje restringido, se presentan apreciables problemas de sodificación. La presencia de yeso en el suelo atenúa su peligrosidad. Puede utilizarse esta agua en suelos de textura gruesa de buena permeabilidad.

S3-Alta peligrosidad sódica

Utilizar este tipo de agua puede provocar niveles dañinos de sodio intercambiable en casi todos los suelos, los que requerirán un manejo especial de drenaje y lixiviación. En suelos yesosos se atenúa este riesgo.

S4-Muy alta peligrosidad sódica

Esta agua en general es inadecuada para riego salvo el caso de agua que por su baja salinidad permita la solubilización de calcio presente en el suelo.

Es muy complejo predecir el impacto de una determinada calidad de agua debido a los múltiples factores que intervienen, por lo que se han propuesto modificaciones a la RAS, ejemplo de ello son RAS ajustada de Ayers y Westcot (1985) y RAS⁰ de Pizarro Cabello (1996) que tienen en cuenta las concentraciones de carbonatos, bicarbonatos y de calcio y magnesio.

3.2. RAS⁰

Pizarro Cabello (1996) hace referencia a que se sobreestima la peligrosidad del sodio y que debe considerarse la RAS⁰ definida como:

$$RAS^0 = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca^0 + Mg}{2}}}$$

Donde Ca⁰ es la concentración corregida del calcio del agua del suelo. Este valor depende de la salinidad del agua de riego y de factores que afectan a la precipitación o disolución del calcio, como el tenor de CO₂ disuelto en la solución edáfica y la relación de bicarbonatos y calcio en el agua de riego.

Para obtener el valor de Ca⁰ se adjunta la Tabla 3 propuesta por Suarez donde es necesario conocer la CE del agua de riego y la relación CO₃H⁻/Ca⁺⁺ en meq L⁻¹.

Luego en la Figura 3 de acuerdo a la RAS⁰ y a la CE del agua de riego se puede determinar el riesgo de sodicidad.

Tabla 3. Concentración de calcio (Ca⁰) en función de la conductividad eléctrica del agua de riego y de la relación CO₃H⁻/Ca⁺⁺ de esta (Pizarro, 1996).

Relación CO ₃ H ⁻ /Ca ⁺⁺	Salinidad del agua de riego (dS m ⁻¹)									
	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1	1,5	2	3	4
0,05	13,2	13,61	13,92	14,4	14,79	15,26	15,91	16,43	17,28	17,97
0,1	8,31	8,57	8,77	9,07	9,31	9,62	10,02	10,35	10,89	11,32
0,15	6,34	6,54	6,69	6,92	7,11	7,34	7,65	7,9	8,31	8,64
0,2	5,24	5,4	5,52	5,71	5,87	6,06	6,31	6,52	6,86	7,13
0,25	4,51	4,65	4,76	4,92	5,06	5,22	5,44	5,62	5,91	6,15
0,3	4	4,12	4,21	4,36	4,48	4,62	4,82	4,98	5,24	5,44
0,35	3,61	3,72	3,8	3,94	4,04	4,17	4,35	4,49	4,72	4,91
0,4	3,3	3,4	3,48	3,6	3,7	3,82	3,98	4,11	4,32	4,49
0,45	3,05	3,14	3,22	3,33	3,42	3,53	3,68	3,8	4	4,15
0,5	2,84	2,93	3	3,1	3,19	3,29	3,43	3,54	3,72	3,87
0,75	2,17	2,24	2,29	2,37	2,43	2,51	2,62	2,7	2,84	2,95
1	1,79	1,85	1,89	1,96	2,01	2,09	2,18	2,23	2,35	2,44

1,25	1,54	1,59	1,63	1,68	1,73	1,78	1,86	1,92	2,02	2,1
1,5	1,37	1,41	1,44	1,49	1,53	1,58	1,65	1,7	1,79	1,86
1,75	1,23	1,27	1,3	1,35	1,38	1,43	1,49	1,54	1,62	1,68
2	1,13	1,16	1,19	1,23	1,26	1,31	1,36	1,4	1,48	1,54
2,25	1,04	1,08	1,1	1,14	1,17	1,21	1,26	1,3	1,37	1,42
2,5	0,97	1	1,02	1,06	1,09	1,12	1,17	1,21	1,27	1,32
3	0,85	0,89	0,91	0,94	0,96	1	1,04	1,07	1,13	1,17
3,5	0,78	0,8	0,82	0,85	0,87	0,9	0,94	0,97	1,02	1,06
4	0,71	0,73	0,75	0,78	0,8	0,82	0,86	0,88	0,93	0,97
4,5	0,66	0,68	0,69	0,72	0,74	0,76	0,79	0,82	0,86	0,9
5	0,61	0,63	0,65	0,67	0,69	0,71	0,74	0,76	0,8	0,83
7	0,49	0,5	0,52	0,53	0,55	0,57	0,59	0,61	0,64	0,67
10	0,39	0,4	0,41	0,42	0,43	0,45	0,47	0,48	0,51	0,53
20	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,3	0,32	0,33
30	0,18	0,19	0,2	0,2	0,21	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25

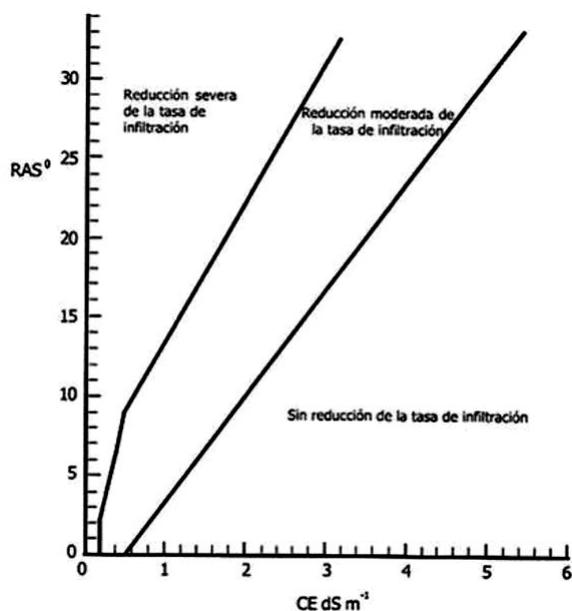


Figura 3. Riesgo de sodicidad en función de RAS^0 (Pizarro, 1996).

3.3. Carbonato de Sodio Residual (CSR)

Actualmente para evaluar el peligro de sodicidad de un agua de riego uno de los indicadores más utilizados es el índice de Carbonato de Sodio Residual (CSR). Un suelo regado con agua con un CSR alto (exceso de carbonatos y bicarbonatos en relación con el contenido de calcio y magnesio) puede transformarse en sódico.

Se determina mediante la siguiente fórmula expresando los iones en $meq L^{-1}$:

$$CSR = \left[(CO_3^{2-} + CO_3H^-) - (Ca^{++} + Mg^{++}) \right]$$

El valor obtenido de CSR se clasifica de la siguiente manera:

- Recomendables: aguas con menos de 1,25 meq L⁻¹ de CSR.
- Poco recomendables: aguas con 1,25 meq L⁻¹ a 2,5 meq L⁻¹ de CSR.
- No recomendables: aguas con valores superiores a 2,5 meq L⁻¹ de CSR.

4. Efectos por toxicidad con cloro, sodio y boro

Algunos solutos tienen efecto tóxico directo sobre los cultivos, los problemas de toxicidad se diferencian de los de salinidad en que ocurren dentro de las plantas. Se producen cuando un ion absorbido se acumula en las hojas, por efecto de la transpiración, hasta un nivel que daña la planta. El grado de daño depende del tiempo, la concentración, la sensibilidad del cultivo y el consumo de agua.

Los iones de las aguas de riego que pueden causar daño en forma individual o combinada son: cloro (Cl), sodio (Na) y boro (B) (Maas, 1984).

La tolerancia al cloro de los cultivos no está bien documentada como la tolerancia a la salinidad. El riesgo de toxicidad puede ser por absorción a través de las raíces o por absorción foliar en el caso de cultivos regados por aspersión con alta temperatura y baja humedad relativa (Ayers y Westcot, 1985; Maas, 1986).

El cloro, que no es adsorbido por el suelo, y se mueve fácilmente en la solución desde donde es absorbido por la planta y circula en ella hasta acumularse en las hojas. Si la concentración sobrepasa la tolerancia del cultivo, aparecen claros síntomas de toxicidad que incluyen hojas quemadas y necrosis de tejidos (Bernstein, 1974; Maas, 1984, 1986). En los cultivos sensibles, los síntomas ocurren cuando la concentración de cloro alcanza los 0,3 a 1,0% del peso seco (Bernstein, 1975).

Los síntomas de toxicidad por sodio son el quemado y muerte de tejidos en la periferia de la hoja, comienzan en las hojas más maduras, progresando hacia el centro y finalmente en las hojas jóvenes. En los cultivos sensibles, principalmente en los que tienen ciclo pluri-anual (árboles frutales), los síntomas de toxicidad debidos al Na aparecen a niveles de 0,25 a 0,50% en peso seco.

El boro es un elemento esencial para las plantas en cantidades relativamente pequeñas y se vuelve tóxico cuando sobrepasa determinados niveles. Normalmente los problemas de toxicidad aparecen por altas concentraciones en agua de riego de origen subterráneo. En cultivos sensibles como trigo, cebada y girasol la concentración máxima tolerada es 0,75⁻¹ mg L⁻¹; en moderadamente tolerantes como avena, maíz y melón 2-4 mg L⁻¹ y en tolerantes como sorgo y alfalfa 4-6 mg L⁻¹. El algodón es un cultivo muy tolerante a elevados contenidos de boro (Ayers y Westcot, 1985).

Los síntomas de toxicidad por boro, que normalmente aparecen primero en las hojas más viejas, son amarillamiento, progresivo marchitamiento y necrosis desde el borde hacia el centro de la hoja a medida que aumenta la concentración (Wilcox, 1960; Prieto y Angueira, 1996).

5. Bibliografía

- Avellaneda, M.O.; A.I. Bermejillo y L.E. Mastrantonio. 2004. Aguas de Riego. Calidad y evaluación de su factibilidad de uso. UNCU. EDIUNC. ISBN: 950-39-0030-1
- Ayers, R.S. y D.W. Westcot. 1985. Water quality for agriculture. FAO, Irrigation and drainage, Paper 29 rev. 1, Roma. 174 pp.
- Báez, A. 1999. Efectos de la calidad del agua de riego sobre las propiedades del suelo. Monografía presentada como requisito para optar al grado académico de Especialista en Producción Vegetal. Unidad Integrada, Facultad de Ciencias Agrarias-Univ. Nac. de Mar del Plata y EEA INTA Balcarce.
- Bernstein, L. 1961. Osmotic adjustment of plants to saline media. I. Steady state. *Am. J. Bot.* 48: 904-918.
- Bernstein, L. 1974. Crop growth and salinity. Pp 39-54. In: J Van Shilfgaarde (Ed.) *Drainage for agriculture. Agron. Monog.* 17.
- Bernstein, L. 1975. Effects of salinity and sodicity on plant growth. *Ann. Rev. Phytopathol.* 13: 295-312.
- BRS (Bureau of Rural Sciences). 2000. Evaluación de posibilidades físicas y económicas de riego con aguas subterráneas en la provincia de San Luis. 239 pp.
- FAO. 2012. Aquacrop. Disponible en: <http://www.fao.org/nr/water/docs/AquaCropV40Note.pdf>.
- Maas, E.V. 1984. Crop tolerance. *Calif. Agric.* 38 (10): 20-21.
- Maas, E.V. 1986. Salt tolerance of plants. *Applied Agric. Res.* 1(1): 12-26.
- Nosetto, M.D.; E.G. Jobbágy; R.B. Jackson y G.A. Sznaider. 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crops Res.* 113: 138–148.
- Pizarro Cabello, F. 1996. Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF), goteo, microaspersión, exudación. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Prieto, D. y M.C. Angueira. 1996. Calidad de agua para riego. Módulo II. En: Curso a distancia de "Métodos de riego". INTA-PROCADIS, Programa Clima y agua. 94 pp.
- Rhoades, J.D. 1972. Quality of water for irrigation. *Soil Sci.* 113: 277-284.
- Rhoades, J.D.; A. Kandiah y A.M. Mashali. 1992. The use of saline waters for crop production. FAO, Irrigation and drainage, Paper 48, Roma.
- Richards, L.A. 1954. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Manual de agricultura No 60. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América. 171 pp.
- Thorne, D.W. y H.B. Peterson. 1954. *Irrigated soils.* London: Constable and Company.
- Wilcox, L.V. 1960. Boron injury to plants. *U. S.D.A Inf. Bull.* 211, 7 pp.

Relación entre el agua de riego y los cultivos

Claudio Alejandro Saenz y Matias Alejandro Vergés Manzur

EEA INTA San Luis

1. Resistencias al flujo de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera

El agua es absorbida por las plantas desde el suelo y liberada a la atmósfera a través de la transpiración. Este proceso es un equilibrio entre la diferencia de potencial hídrico entre el suelo y la atmósfera, y las resistencias al flujo que generan la matriz del suelo y los distintos órganos de la planta.

Los estomas cumplen un papel fundamental en esta regulación debido a que en ellos se produce la capa límite que es la interface entre los tejidos vegetales y la atmósfera.

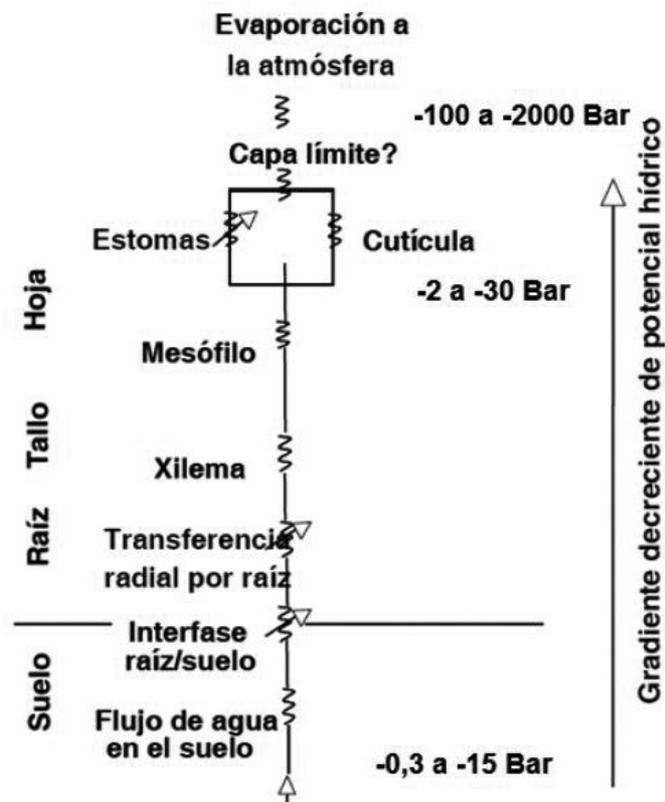


Figura 1. Resistencias al flujo de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera.

2. Efecto de la calidad de agua de riego sobre los cultivos

El desempeño de la agricultura bajo riego depende de múltiples factores entre los que incide la cantidad y calidad de agua que disponen los cultivos y si cuentan con esta en el momento oportuno.

En un sistema productivo bajo riego, la calidad del agua de riego genera cambios en el perfil del suelo hasta lograr un nuevo equilibrio. Los indicadores de mayor incidencia sobre

la producción son la salinidad (CE) del agua de riego y del extracto de saturación del suelo, pH y porcentaje de sodio intercambiable en el perfil del suelo (PSI).

Los cultivos al evapotranspirar agua desde el perfil van concentrando las sales presentes en la solución del suelo. Esto hace que se incremente el potencial osmótico del suelo y que el agua sea retenida con mayor fuerza en este, quedando menos disponible para los cultivos.

Al incrementarse la salinidad disminuye el rendimiento potencial de los cultivos. La CE umbral y la velocidad a la que disminuye el rendimiento en función de CE de la solución del suelo depende de la tolerancia de la especie, en la Tabla 1 se presenta el porcentaje de disminución de rendimiento potencial para distintos cultivos en función de los valores de CE del agua de riego y del extracto de saturación del suelo (FAO, 1985).

Tabla 1. Disminución del rendimiento potencial en función de la salinidad del agua de riego CE_{ar} y del extracto de saturación del suelo CE_s .

Especie y tolerancia a salinidad	CE umbral $dS\ m^{-1}$ $25^{\circ}C$	Disminución rendimiento por unidad de CE	Disminución del rendimiento (%)							
			0		10		25		50	
			CE_s	CE_{ar}	CE_s	CE_{ar}	CE_s	CE_{ar}	CE_s	CE_{ar}
Ajo (S)	3,9	14,3								
Alfalfa (T)	2,0	7,3	2,0	1,3	3,4	2,2	5,4	3,6	8,8	5,9
Algodón (MT)	7,7	5,2	7,7	5,1	9,6	6,4	13,0	8,4	17,0	12,0
Cebolla (S)	1,2	16,1	1,2	0,8	1,8	1,2	2,8	1,8	4,3	2,9
Cítricos (S)	1,7	15,9	1,7	1,1	2,3	1,6	3,2	2,2	4,8	3,2
Garbanzo (MS)										
Girasol (MT)	4,8	5,0								
Maíz (S)	1,8	7,4	1,8	1,2	3,2	2,1	5,2	3,5	8,6	5,7
Melón (S)	2,5		2,2	1,5	3,6	2,4	5,7	3,8	9,1	6,1
Maní (MS)	3,2	29	3,2	2,1	3,5	2,4	4,1	2,7	4,9	3,3
Olivo (T)	4,0		2,7	1,8	3,8	2,6	5,5	3,7	8,4	5,6
Papa (S)	1,7	12,0	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	5,9	3,9
Soja (T)	5,0	20,0	5,0	3,3	5,5	3,7	6,2	4,2	7,5	5,0
Sorgo grano (MT)	4,8	16	4,0	2,7	5,1	3,4	7,2	4,8	11,0	7,2
Trigo (T)	6,0	7,1	6,0	4,0	7,4	4,9	9,5	6,4	13,0	8,7

MT–muy tolerante; T–tolerante; S–sensible

Así también los cultivos poseen diferentes niveles de tolerancia a valores de pH y sodicidad. En la Tabla 2 se presentan los valores de referencia para los distintos cultivos representativos de la zona (FAO, 1985).

Tabla 2. Valores de referencia de pH y sodicidad para distintos cultivos.

Cultivo	pH	Tolerancia PSI
Ajo		
Alfalfa	6,2 – 7,8	T
Algodón	5,0 – 6,0	T
Cebolla		
Cítricos		
Garbanzo		S
Girasol	6,0 – 7,5	
Maíz	5,5 – 7,5	S
Melón		
Maní	5,3 – 6,6	S
Olivo		
Papa	4,8 – 6,5	
Soja	6,0 – 7,0	
Sorgo granífero	5,5 – 7,5	ST
trigo	6,5 – 7,5	ST
S – Sensible PSI < 15		
ST – Semi tolerante PSI 15 a 40		
T – Tolerante PSI > 40		

La concentración de sales o determinados elementos como Na, Cl o B presentes en el agua de riego, a la que los cultivos manifiestan toxicidad, varía de acuerdo al tipo de exposición a estos (radical o foliar). Por lo que además de la calidad del agua de riego también debe tenerse en cuenta el sistema de riego que se elegirá ya que los problemas potenciales dependen de este.

Por ejemplo, es recomendable utilizar riego por goteo si el agua de riego es salina ya que en proximidades de los goteros la fracción de lavado es muy alta y la salinidad del suelo permanecerá similar a la del agua de riego. En la Tabla 3 se presentan los problemas y medidas correctoras en el caso de necesitar regar con agua salina (Aragüés, 2011).

Tabla 3. Salinidad y sistemas de riego: síntesis de problemas potenciales y medidas correctoras (Extraído de Aragüés, 2011).

Sistema de riego	Problema potencial	Medidas correctoras
Inundación	Baja uniformidad de distribución de agua, lavado diferencial.	Nivelación por láser; evitar encharcamientos prolongados; incrementar la frecuencia de riego (con dosis menores en cada riego).
Surcos	Evaporación de agua y acumulación de sales en la parte superior de los caballones.	Acolchado del caballón; reformado del caballón; sembrar a los lados del caballón; riego en surcos alternados.
Aspersión	Mojado de las hojas y absorción iónica foliar; toxicidad iónica específica.	Evitar el mojado de las hojas; regar por la noche; reducir la frecuencia y aumentar los tiempos de riego; aplicar lavados con agua dulce si es disponible.

Goteo	Acumulación de sales en los bordes del bulbo húmedo; taponamiento de goteros. Goteo subterráneo: acumulación de sales entre la superficie del suelo y la línea de goteo.	Aumentar la densidad de goteros; conectar el riego si llueve (evita la entrada de sales a la zona radicular); acidificar el agua. Goteo subterráneo: lavar las sales acumuladas en superficie regando por inundación o aspersión.
-------	---	--

3. Evapotranspiración potencial (E_t_0)

La evapotranspiración potencial (E_t_0) se define como el requerimiento hídrico de un cultivo ideal sin estrés hídrico y que cubre el suelo totalmente. Este valor es función del déficit de presión de vapor (DPV) (inversa de la humedad relativa ambiente) de la atmósfera, de la velocidad media del viento, de la radiación neta incidente, de la temperatura y de la altitud. A este valor normalmente lo calculan las estaciones meteorológicas automáticas utilizando el método de cálculo de Penman–Monteith modificado por FAO. Los valores de E_t_0 diaria para Villa Mercedes se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Evapotranspiración potencial (mm día^{-1}) en Villa Mercedes. Período 1994-2012. D.E.=Desvío Estándar.

Mes	Media	D.E.	Mediana
Enero	6,51	0,96	6,60
Febrero	5,84	0,99	5,80
Marzo	4,53	1,09	4,40
Abril	3,33	0,83	3,30
Mayo	2,28	0,66	2,20
Junio	1,87	0,52	1,90
Julio	2,22	0,61	2,20
Agosto	3,30	0,87	3,20
Septiembre	4,57	1,23	4,40
Octubre	5,31	1,24	5,00
Noviembre	6,41	0,97	6,40
Diciembre	7,02	0,99	7,10

4. Coeficiente de cultivo (K_c)

La cantidad de agua que requiera un cultivo en determinado momento va a depender de la etapa fenológica en que se encuentre y va a ser proporcional a la E_t_0 del período considerado. El K_c es el factor proporcional por el que se afecta la E_t_0 para estimar la evapotranspiración del cultivo (E_{t_c}), que es el requerimiento de agua de un determinado cultivo en determinado estado fenológico. Para la mayoría de los cultivos el valor de k_c para todo su ciclo varía entre 0,85 y 0,9. En la Tabla 5 se presentan los valores de k_c sugeridos por FAO para los cultivos que se realizan en la región en sus distintas etapas fenológicas. Mientras que en la Tabla 6 se indica la duración de las distintas etapas de los cultivos. Esta Tabla debe emplearse con precaución, ya que la duración real de las fases varía mucho dependiendo de la zona, del cultivar y de las condiciones climáticas del año. Ambas tablas se basan en datos de FAO (2002).

Cultivo	Estados de desarrollo del cultivo (Kc)					Kc medio
	Inicial	Estado vegetativo	Media estación	Etapas avanzadas	Hacia cosecha	
Ajo	0,7		1,1-1,2		0,7-1	
Alfalfa	0,3-0,4				1,05-1,2	0,85-1,05
Algodón	0,4-0,5	0,7-0,8	1,05-1,25	0,8-0,9	0,65-0,7	0,8-0,9
Cebolla	0,4-0,6	0,7-0,8	0,95-1,1	0,85-0,9	0,75-0,85	0,8-0,9
Cítricos						0,85-0,9
Garbanzo			1		0,35	
Girasol	0,3-0,4	0,7-0,8	1,05-1,2	0,7-0,8	0,35-0,45	0,75-0,85
Maíz	0,3-0,5	0,7-0,85	1,05-1,2	0,8-0,95	0,5-0,6	0,75-0,9
Melón	0,4-0,5	0,7-0,8	0,95-1,05	0,8-0,9	0,65-0,75	0,75-0,85
Maní	0,4-0,5	0,7-0,8	0,95-1,1	0,75-0,85	0,55-0,6	0,75-0,8
Olivo	0,65		0,7		0,7	0,7
Papa	0,4-0,5	0,7-0,8	1,05-1,2	0,85-0,95	0,7-0,75	0,75-0,9
Soja			1,15		0,5	
Sorgo granífero	0,3-0,4	0,7-0,75	1,0-1,15	0,75-0,8	0,5-0,55	0,75-0,85
Trigo	0,3-0,4	0,7-0,8	1,05-1,2	0,65-0,75	0,2-0,25	0,8-0,9

Tabla 6. Valores indicativos para la duración (días) de las 4 fases para el cálculo de Kc por el método FAO

Cultivo	Duración	Total
Ajo	60/100-45-70-25	220
Algodón	30-50-60-55	195
Cebolla	20-35-110-45	210
Garbanzo	20-25-35-20	100
Girasol	25-35-45-25	130
Maíz	30-40-50-30	150
Melón	20-35-40-30	140
Maní	35-35-35-35	140
Papa	30-35-50-30	145
Soja	20-32/35-60-25	140
Sorgo granífero	20-35-40-30	130
Trigo	20-35-40-30	180

5. Relaciones hídricas suelo-planta

5.1. Disponibilidad de agua y crecimiento de raíces

Las raíces juegan un rol fundamental en el crecimiento de los cultivos y por ende en el rendimiento que se obtenga. La provisión de agua y nutrientes para la planta depende de la posibilidad y capacidad de absorción de estas. De la disponibilidad de estos elementos en el perfil, de su dinámica y del nivel de exploración que logren las raíces en el suelo. Estos factores van a condicionar el movimiento de la solución del suelo (agua y solutos) hacia la superficie absorbente de las raíces.

La tasa de profundización de las raíces de cultivos anuales puede variar desde menos de 2 mm día⁻¹ con temperaturas de suelo bajas y condiciones de resistencia mecánicas altas a más de 80 mm día⁻¹ con temperaturas óptimas y buena humedad en el perfil. En la Figura 2 se presenta la dinámica de crecimiento de raíces de distintos cultivos en la región pampeana.

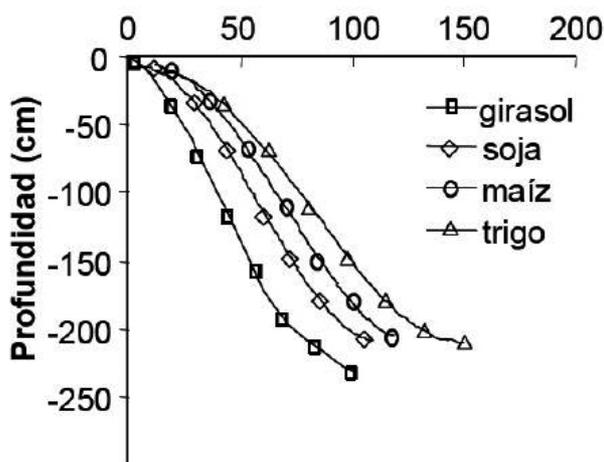


Figura 2. Dinámica de profundización de raíces de girasol, soja, maíz y trigo en función de días, obtenidas en mediciones a campo en Hapludoles del SO de Santa Fe (Andriani, 2003).

En condiciones de buena humedad y climas templados los cultivos de maíz, sorgo y trigo pueden explorar hasta 1,5 m de profundidad, mientras que la soja puede explorar hasta 2 m de profundidad y el girasol 3 m. Pero por lo general más de la mitad de las raíces se concentran en los estratos superficiales del perfil.

El suelo retiene el agua con un potencial que es inversamente proporcional a su contenido hídrico. Cuando el perfil se encuentra lleno próximo a capacidad de campo (CC), es decir en su límite superior (I_s), el potencial con que esta retenida el agua es de -0,3 bar. En el límite inferior (I_i) en que la mayoría de los cultivos estarían en marchitez permanente (PMP) y no se podrían recuperar, el suelo retiene el agua con un potencial de -15 bar. En la Figura 3 se presenta el mínimo contenido de agua alcanzado por cultivos de girasol, soja, maíz y trigo, sembrados en un suelo franco limoso (Haplustol Éntico) en Manfredi (Córdoba).

Las plantas son capaces de generar un crecimiento compensatorio de raíces en zonas de suelo favorable cuando el crecimiento normal se ve restringido en otra parte. Puede haber crecimiento de raíces en zonas cercanas a punto de marchitamiento cuando otras partes del sistema radicular se encuentran en suelo húmedo. Estos mecanismos les permiten explorar un mayor volumen de suelo.

Si bien bajo condiciones de buena humedad, la mayor parte del agua es extraída de la parte superior del perfil; a medida que este se seca una pequeña cantidad de raíces en zonas húmedas profundas puede proveer cantidades de agua no proporcionales a su número.

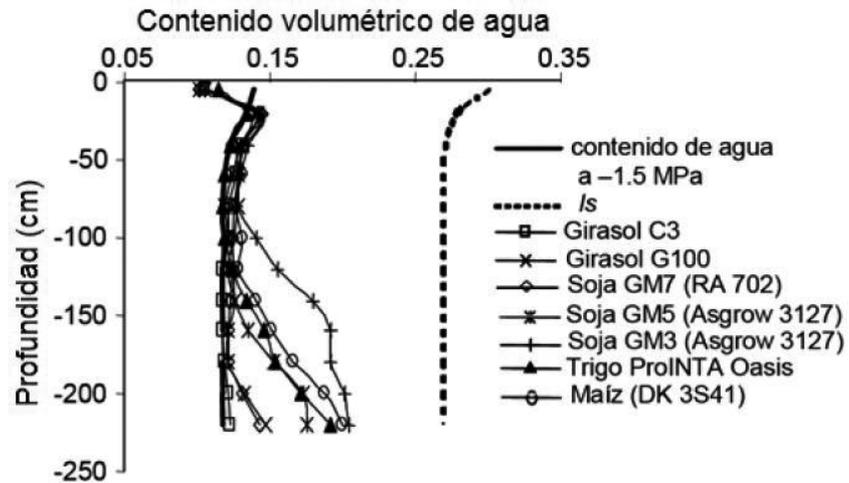


Figura 3. Mínimo contenido de agua alcanzado por cultivos de girasol, soja, maíz y trigo, sembrados en un suelo franco limoso (Haplustol Éntico) en Manfredi (Córdoba) durante la campaña 1992-1993. La línea punteada señala el límite superior (I_s) y la línea llena indica el contenido de agua medido en laboratorio a un potencial de $-1,5$ MPa. El límite inferior (I_i) del girasol C3 coincide con dicho potencial hasta los 220 cm de profundidad. GM: grupo de madurez (Dardanelli y Bachmeier, 1993).

5.2. Déficit hídrico y crecimiento de los cultivos

El momento en el cual se debe comenzar a regar es cuando el cultivo ha consumido una fracción del agua disponible en el suelo y se aproxima al umbral de riego, a partir del cual sufrirá estrés hídrico.

El umbral de riego depende de la demanda atmosférica, de la capacidad del cultivo de extraer agua, de la textura y conductividad hidráulica del suelo, por lo tanto el umbral de riego no es fijo, y es inversamente proporcional a la E_{t_0} . Es decir que a mayor E_{t_0} mayor debe ser la frecuencia de riego. FAO recomienda los umbrales que se presentan en la Tabla 7 propuestos por Doorenbos y Kassam (1979).

Tabla 7. Umbral (porcentaje de agotamiento de agua útil) recomendados para distintos tipos de cultivos de acuerdo a la evapotranspiración potencial (E_{t_0}).

Tipo de cultivo	E_{t_0} mm día ⁻¹								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cebolla y papa	0,50	0,43	0,35	0,30	0,25	0,23	0,20	0,20	0,18
Alfalfa, cítricos, maní, girasol, melón y trigo	0,80	0,70	0,60	0,50	0,45	0,43	0,38	0,35	0,30
Algodón, sorgo, olivo, maíz y soja	0,88	0,80	0,70	0,60	0,55	0,50	0,45	0,43	0,40

Cuando un cultivo agrícola sufre un déficit hídrico tiene un impacto negativo sobre el rendimiento final, la magnitud de este depende de la etapa fenológica en que se produce. En la mayor parte de los cultivos el período crítico es durante la floración como lo muestra la Figura 4 para el caso de trigo y maíz.

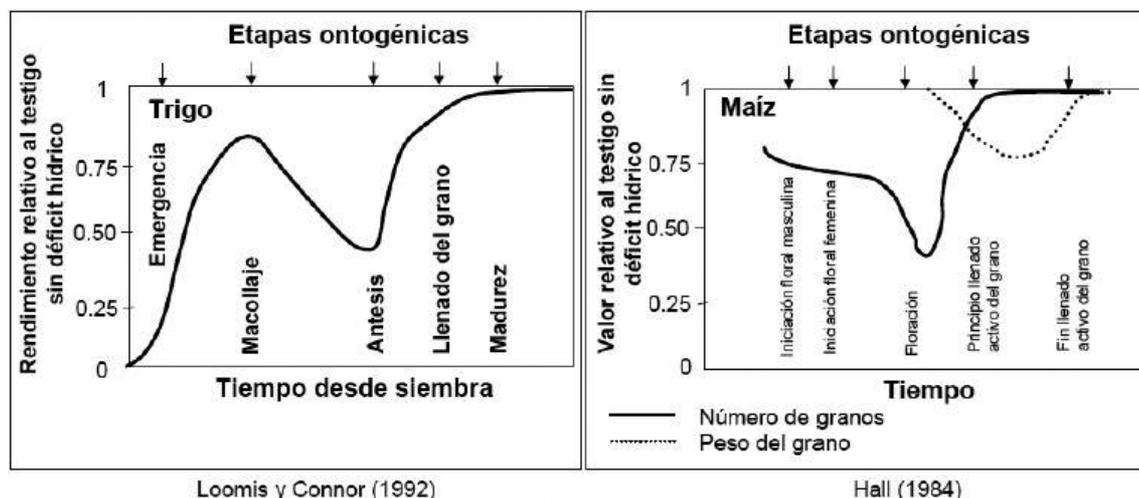


Figura 4. Respuesta al déficit hídrico del rendimiento en grano y sus componentes, períodos críticos, citados por Maddonni (2010).

5.3. Eficiencia en el uso del agua por parte de los cultivos

La eficiencia con la que utilizan el agua los cultivos depende de diversos factores relacionados con las características físico-químicas del perfil del suelo y del agua de riego, las características climáticas durante el ciclo de cultivo y de las características del cultivar o híbrido. En la Tabla 8 se presenta la eficiencia en el uso del agua de los principales cultivos de la región (FAO, 2002).

Tabla 8. Eficiencia en el uso del agua de diferentes cultivos de la región.

Cultivo	kg mm ⁻¹
Ajo	
Alfalfa forraje	15 – 20
Algodón	4 – 6
Cebolla	80 -100
Cítricos	20-50
Garbanzo	
Girasol	3 – 5
Maíz	8 – 16
Melón	50 -80
Maní	7
Olivo	15 – 20
Papa	40 – 70
Soja	4 – 7
Sorgo granífero	6 – 10
Trigo	8 – 10

5.4. Factores que modifican la eficiencia en el uso del agua por parte de los cultivos

5.4.1 Déficit de presión de vapor (DPV)

La cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera tiene un efecto directo en la habilidad de las plantas para transpirar y crecer. El déficit de presión de vapor se usa actualmente para indicar la humedad y puede ser relacionado directamente a la condición de confort o estrés de las plantas. Es la inversa al valor de humedad relativa del aire (Hr).

Si el DPV es demasiado alto (Hr baja), los estomas en las hojas tienden a cerrarse para limitar la transpiración y prevenir el marchitamiento. Este cierre estomático también limitará la captación de CO_2 y la fotosíntesis, lo que producirá un bajo crecimiento. Por el contrario, si el DPV es demasiado bajo (Hr alta), los estomas abrirán totalmente, pero las plantas serán incapaces de transpirar lo suficiente para transportar minerales adecuadamente desde el suelo por lo que se produce una disminución de la tasa de crecimiento.

En la Figura 5 se presentan diferentes niveles de eficiencia en el uso del agua EUA en trigo para diferentes ambientes y DPV. Donde se observa que a medida que se incrementa el DPV disminuye la eficiencia en el uso del agua.

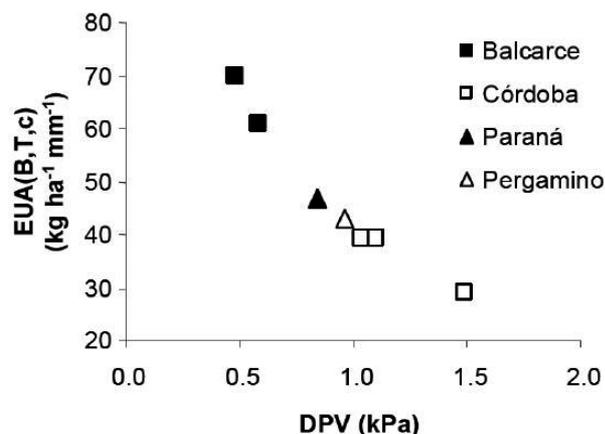


Figura 5. Relación entre la eficiencia en el uso del agua (EUA) en trigo y el déficit de presión de vapor (DPV), en cuatro localidades de la región pampeana, para períodos de cobertura del suelo >90%. Adaptado por Maddonni (2010).

5.4.2 Cobertura

La radiación que llega a la superficie del suelo está directamente relacionada a la pérdida de agua por evaporación. Este fenómeno se manifiesta con mayor magnitud en suelos limosos en los que por mayor capilaridad transportan agua desde el perfil del suelo a la superficie desde donde se evapora.

Para reducir la pérdida de agua por evaporación es importante mantener el suelo cubierto para disminuir la temperatura superficial. Esto se puede lograr mediante siembra directa incrementando la cobertura del suelo con rastrojos y mediante cultivos de cobertura, que se secan en primavera temprana y ayudan a disminuir las pérdidas de agua durante los primeros estadios del cultivo agrícola siguiente.

5.4.3 Fertilidad del suelo

Mejoras en la fertilidad del perfil del suelo permiten desarrollar un sistema radicular que explore mejor el suelo y que llegue a mayor profundidad. La capacidad de las raíces de explorar el perfil está directamente relacionada al agua útil y a los nutrientes disponibles.

5.4.4 Impedimentos edáficos

Existen diferentes tipos de impedimentos que pueden ser de origen genético del suelo o producidos por problemas de manejo. Estos problemas edáficos si son superficiales pueden reducir la velocidad de infiltración del agua y reducir o impedir la penetración de las raíces, y si se encuentran en profundidad, por ejemplo una capa de tosca, reducen el volumen de suelo que puede ser explorado por el cultivo, afectando la cantidad de agua útil y nutrientes disponibles.

5.5. Evaporación y transpiración. Importancia y factores que la modifican

La evapotranspiración se divide en dos componentes: transpiración que es la salida de agua desde el perfil a través de las hojas del cultivo y evaporación que es la pérdida de agua directamente desde la superficie del suelo a la atmósfera o desde el cultivo si este está mojado.

En la Figura 6 se observa cómo se reduce la evaporación desde la superficie del suelo después de una lluvia o un evento de riego. A este proceso lo podemos dividir en dos fases:

Fase 1 que es directamente dependiente de la energía de la radiación que alcanza la superficie del suelo. Esta se produce cuando hay agua libre en los horizontes superficiales. Esta fase es proporcional a la ET_0 , hasta que su valor acumulado alcanza un valor umbral (U), que varía según el tipo de suelo (5 mm para arenas y arcillas expansibles, 6-7 mm para suelos franco limosos y 14 mm para suelos franco arcillosos).

Fase 2 que depende de las propiedades hidráulicas del suelo, representadas en la constante a (valores de 1,7–8,2), y del tiempo transcurrido desde el inicio de la fase (t).

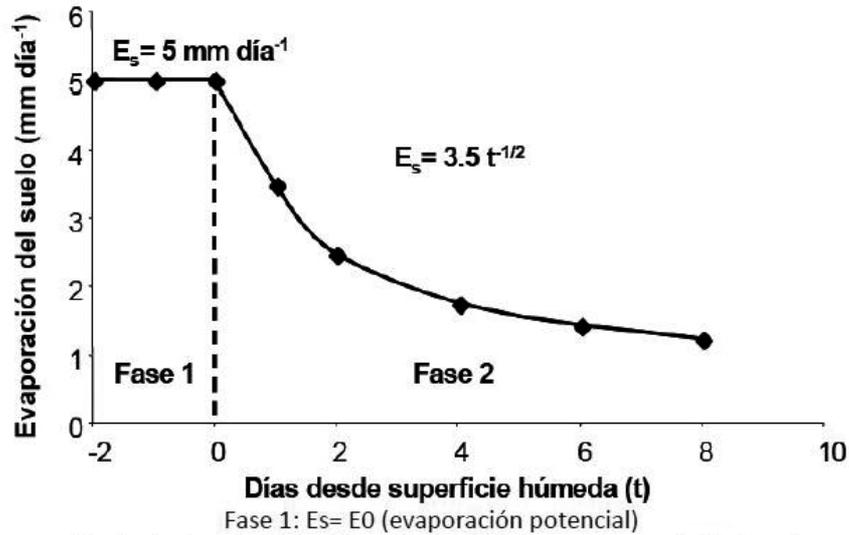


Figura 6. Evaporación desde la superficie del suelo después de un evento de lluvia o riego. Fase 2: $E_s = a t^{-1/2}$ (donde (a) es un coeficiente empírico asociado al suelo). Adaptado por Maddonni (2010).

Las prácticas de labranza y manejo pueden modificar los patrones de infiltración de agua en el perfil y la pérdida de agua por evaporación desde el suelo en Fase 2 como se muestra en la Figura 7. Incrementando el porcentaje de agua que ingresa al perfil del suelo y queda disponible para ser transpirado por el cultivo. La pérdida de agua en esta fase también estará condicionada por la cobertura del suelo y la textura del perfil que caracteriza el ascenso capilar.

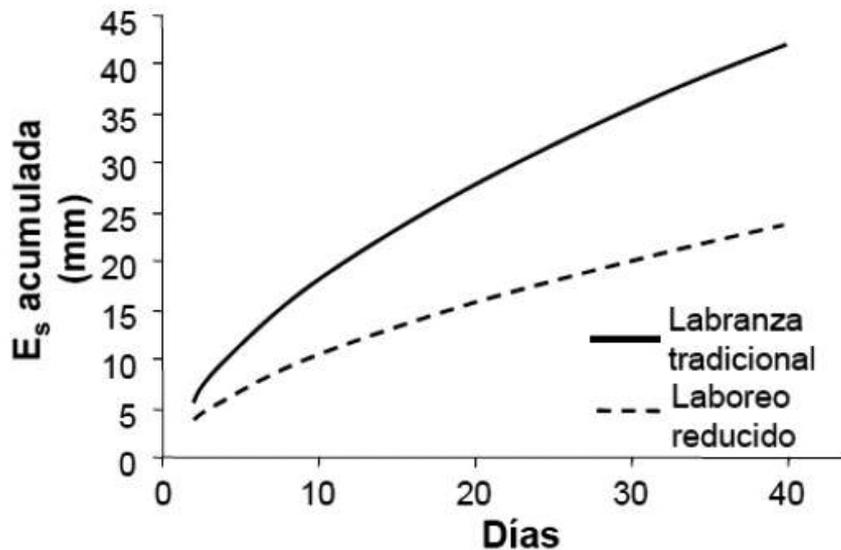


Figura 7. La labranza conservacionista reduce la evaporación desde el suelo (ES) principalmente en Fase 2. Adaptado de Dardanelli et al. (1994).

6. Bibliografía

- Andreani, J. 2003. Crecimiento de las raíces de trigo, maíz y soja en suelos Hapludoles de la provincia de Santa Fe. Pp 15-18. En: "Para mejorar la producción 22", Trigo campaña 2002/03, INTA Oliveros.
- Aragüés, R. 2011. Calidad del agua para el riego: efectos sobre plantas y suelos. En: C Trillo (Dir.). Riego por aspersión. Huesca, Riegos del Alto Aragón: 18-23.
- Dardanelli, J.L. y O.A. Bachmeier. 1993. Profundidad efectiva de raíces y límite inferior de agua útil determinado en campo para diferentes cereales y oleaginosos. XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Trabajos y Comunicaciones Resumidos.
- Dardanelli, J.L.; O.A. Bachmeier; H.P. Salas; E.E. Lovera y F. Núñez Vázquez. 1994. Evaporación en un Haplustol Éntico bajo dos sistemas de labranza. Ci. Suelo (Argentina) 12:17-21.
- Doorenbos, J. y A.H. Kassam. 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper N.o. 33. Roma, FAO.
- FAO. 1985. Revised version of Irrigation and Drainage Paper No. 29. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/005/y4263e/y4263e0e.htm>
- FAO. 2002. Yield response to water. Part A of Irrigation and drainage paper N° 33. Disponible en: <http://www.fao.org/landandwater/aglw/cropwater/parta.stm>
- Maddonni, G.A. 2010. Curso Dinámica del agua en suelo. Economía del Agua en los sistemas cultivados. Cátedra de Cereales FA-UBA-CONICET.

Métodos de riego

Claudio Alejandro Saenz
EEA INTA San Luis

1. Uso y manejo del agua en agricultura

Para mejorar los rendimientos es fundamental maximizar la cantidad de agua disponible para transpiración del cultivo con una visión sistémica. Esto implica conocer la cantidad, distribución e intensidad de las precipitaciones.

Las características del suelo en cuanto a la velocidad de infiltración y capacidad de almacenaje de agua en el perfil, la presencia y calidad de napa freática.

Las características del sistema de riego en cuanto a la pluviometría que entrega bajo distintas condiciones de trabajo.

La capacidad del cultivo para explorar el perfil y obtener agua y nutrientes.

La influencia de estos aspectos sobre el agua disponible para el cultivo puede ser modificada mediante prácticas de manejo. Cambios en la fecha de siembra y/o variedad utilizada pueden mejorar el balance hídrico del cultivo. Mientras que prácticas conservacionistas de manejo del suelo y labranzas pueden contribuir a disminuir las pérdidas por escorrentía y evaporación de agua, incrementando la proporción de agua que ingresa al perfil y queda disponible para el cultivo.

El agua es un recurso cada vez más escaso y no solo en cantidad, sino también en calidad. Es por ello que los regantes están obligados a manejarla con la mayor eficiencia posible, dentro de los condicionantes económicos que toda actividad productiva conlleva, pero no solo ellos, sino también el resto de los usuarios urbanos e industriales (Tarjuelo Martín-Benito, 1999).

El uso de sistemas de riego ineficientes implica que se produzcan pérdidas por infiltración profunda o escorrentía. Que si bien permiten una reutilización posterior del agua al pasar a cauces superficiales o recarga de acuíferos, esto genera un incremento en los costos y se puede producir un deterioro de la calidad de esta. Además de requerir un sobredimensionamiento de la infraestructura de almacenaje y conducción en el caso de sistemas de riego colectivos.

Ante una demanda creciente por el agua disponible es importante mejorar el manejo y diseño de los sistemas de riego. Esto es fundamental para mejorar la uniformidad de aplicación del agua. La falta de uniformidad de aplicación se compensa incrementando la cantidad de agua aplicada cuando el agua no es una limitante (Tarjuelo Martín-Benito, 1999). En los sistemas de riego presurizados es importante conocer la presión a la que trabaja el equipo y la pluviometría que entrega a distintas velocidades de avance para impedir que se produzca escorrentía.

Las instalaciones y equipos de riego deben estar bien diseñados para lograr un coeficiente de uniformidad aceptable y el mantenimiento es fundamental, considerando que no siempre lo más barato es lo mejor.

En el caso de pivotes, es muy importante durante las tareas de mantenimiento respetar el tamaño de la boquilla original de los aspersores, para no alterar la carta de aspersores original.

2. Sistemas de riego utilizados en la provincia de San Luis

En la provincia de San Luis los sistemas de riego tradicionales son por gravedad. A partir de la década de 1990 comenzó a expandirse la superficie bajo riego por aspersión. En parte el incremento en la superficie de estos sistemas se explica por la mayor eficiencia en el uso del agua. En general los sistemas de riego tradicionales por gravedad tienen una eficiencia global de 40%, mientras que en los sistemas de riego por aspersión mediante pivote central esta eficiencia global es de 70% (Seckler, 1996).

Las máquinas de riego más difundidas son los pivotes centrales y en casos puntuales se utilizan cañones o alas regadoras. En los últimos años se han instalado también sistemas de riego por goteo subterráneo destinados a la producción extensiva, siendo una tecnología que está comenzando a difundirse. En la Figura 1 se presenta una clasificación de los distintos sistemas de riego y a continuación en la Tabla 1, las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

Actualmente se incrementa la competencia con otros usuarios por el agua y la energía, incrementándose los costos, por lo que a futuro se difundirán los sistemas eficientes en el uso de ambos insumos.

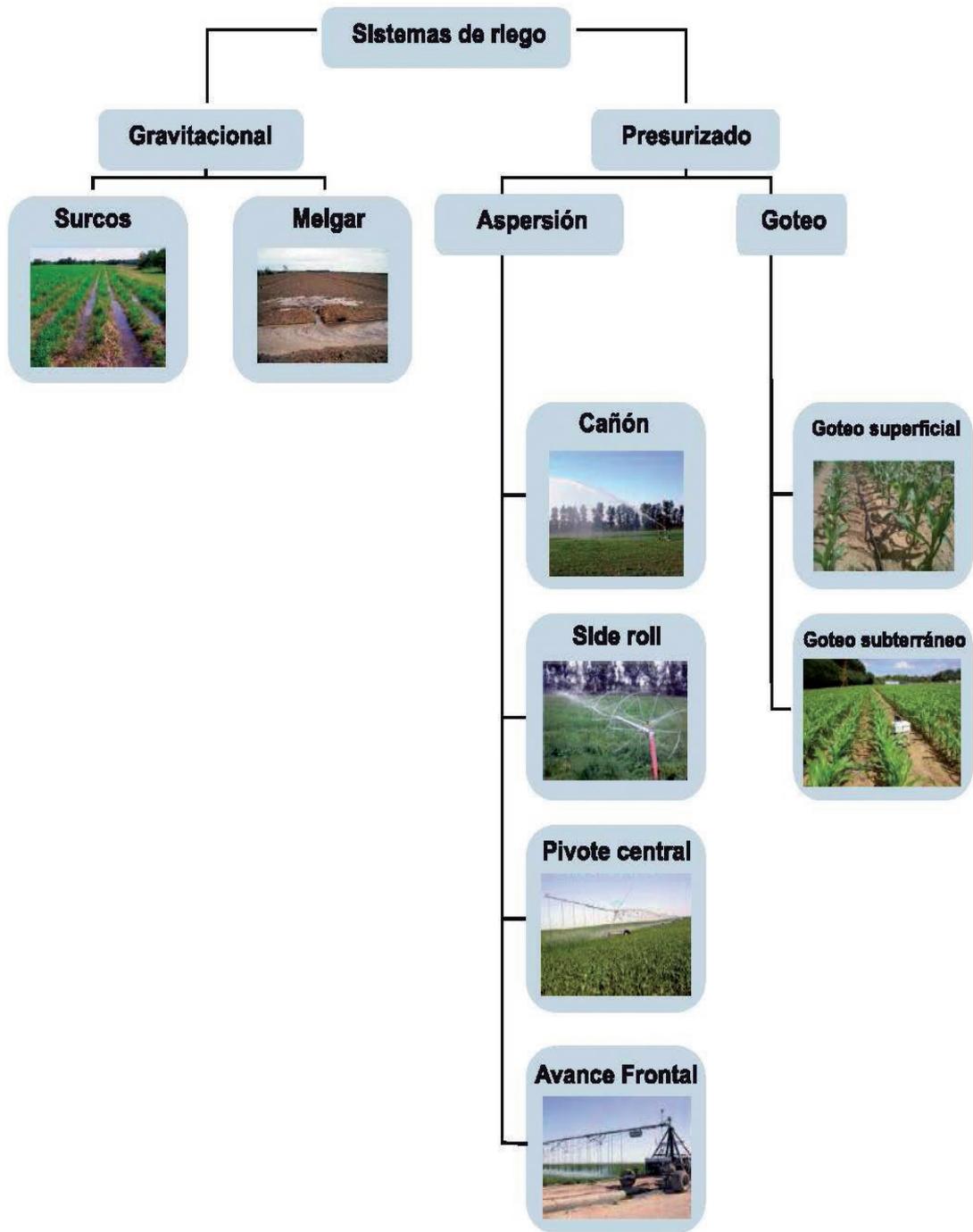


Figura 1. Clasificación de los sistemas de riego utilizados en cultivos extensivos en San Luis.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los sistemas de riego.

Sistema de riego		Características	Ventajas	Desventajas
Gravitacional	Surcos	Es el sistema de riego más difundido, se adapta bien a distintos cultivos.	Baja inversión inicial. No tiene costo energético.	Alto requerimiento de mano de obra. Baja eficiencia en el uso del agua del orden de 40 - 50 %.
	Melgas	Es el sistema tradicional con el que se riegan pasturas.		Requiere de tareas de nivelación.
Presurizado	Cañón	Son los cañones viajeros o cañones enrolladores.	Se adaptan a superficies de 30 – 40 ha. Requieren una inversión inicial baja. Se adaptan bien a cultivos extensivos.	Requieren presiones de trabajo altas de 4,5 – 7 kg cm ⁻² . La eficiencia de distribución es afectada por los vientos.
	Side roll	Es un sistema de riego mecanizado que se adapta a cultivos de menos de 1,2 m de altura.	La inversión inicial es menor a un avance frontal o pivote. Trabaja con presiones de hasta 4 kg cm ⁻² .	La principal desventaja es que no se adapta a cultivos altos como maíz o sorgo.
	Pivote central	Es el sistema de riego mecanizado de mayor difusión. Es un ramal de riego con un extremo fijo y otro móvil que describe un círculo.	Trabaja a presiones de 1,4 a 2,8 kg cm ⁻² . Es el sistema que requiere menos mano de obra. La eficiencia de estos sistemas de riego es de 70 a 80 %.	Tiene limitantes en suelos pesados con baja velocidad de infiltración. La pluviometría es variable lo que limita la longitud de los equipos.
	Avance frontal	Es un ramal similar al pivote pero con los dos extremos móviles, riega superficies rectangulares.	Tiene las ventajas de los pivotes. Puede abastecerse de agua desde perforaciones o canales.	Requiere mayor mano de obra que un pivote.
Goteo	Goteo Superficial	Riego localizado mediante líneas de riego dispuestas sobre el suelo.	Es el sistema más eficiente en el uso del agua, 90 %. Se adapta a cualquier forma y tamaño de superficie. Trabaja con presiones bajas de 1 kg cm ⁻² o superiores. Permite fertirrigación eficiente.	Requiere una inversión alta. El sistema queda fijo en el lote.
	Goteo subterráneo	Riego localizado mediante líneas de riego enterradas.		Requiere de mayor mantenimiento y que el agua sea filtrada.

3. Programación del riego. Balance hídrico

En la gestión de un sistema de riego es ineludible conocer las características del agua de riego, del suelo y del clima del que se dispone, así como las características de los cultivos para poder determinar los momentos y cantidades de agua a aplicar.

Para optimizar el uso del agua se debe seguir el balance hídrico del cultivo. Este balance es función del agua disponible en el perfil del suelo, de las precipitaciones y del requerimiento de agua del cultivo de acuerdo a la etapa fenológica.

Para iniciar el balance hídrico de cada cultivo se debe conocer el agua disponible en el perfil del suelo a la siembra como punto de inicio. El contenido hídrico se puede determinar mediante gravimetría si es posible hasta una profundidad de dos metros. Luego se puede seguir el balance hídrico mediante distintos modelos como Bahicu de INTA Oliveros (Andriani, 2012) o Mopeco de UCLM (España) (Dominguez et al., 2012).

Para proyectar el balance hídrico y estimar las necesidades de riego futuras se puede utilizar información histórica de precipitaciones y E_t0 . Respecto al K_c de cultivo, al no existir datos locales se puede trabajar con los datos de FAO que se encuentran en esta publicación.

A medida que se avanza en el ciclo de cultivo se pueden cargar los datos reales de precipitaciones y E_t0 tomados en el campo o en la estación meteorológica más cercana y en función de esto y de la capacidad del sistema de riego ir tomando las decisiones de aplicación de agua.

En el caso de sistemas de riego por aspersión, hay que tener en cuenta la velocidad de infiltración de agua característica del suelo, de modo de aplicar la mayor lámina posible por evento de riego sin producir escorrentía. Con esto se busca mejorar la eficiencia en el uso del agua al reducir la incidencia de la evaporación desde el suelo y el cultivo respecto del agua aplicada. Incrementando la proporción de agua disponible para transpiración del cultivo.

Para corregir el balance de los modelos informáticos es necesario evaluar el estado hídrico real del perfil y corregir el balance, especialmente al comienzo del período crítico de los cultivos, ya que si se produce estrés en esta etapa tiene un impacto muy importante sobre el rendimiento.

La evaluación del contenido de agua presente en el perfil puede determinarse por gravimetría o mediante otros sistemas como tensiómetros, sondas o cápsulas de cerámica.

4. Modelo Bahicu 1.1 (Andriani, 2012)

En el suelo se encuentra la única reserva de agua para los cultivos extensivos. Hay dos formas de conocer el contenido de agua en el suelo, una a través de mediciones directas y otra con estimaciones de balances hídricos. Esta última, constituye la manera más simple y práctica, cuando es acompañada con modelos empíricos robustos, desarrollados sobre soportes informáticos.

El software de balance hídrico de cultivos extensivos (BAHICU) desarrollado por José Andriani en INTA EEA Oliveros permite una estimación confiable de la disponibilidad diaria de agua en el suelo. Para el desarrollo del balance hídrico de cultivos se toma como base la ecuación de balance hídrico del suelo de FAO 56, transformándola en una ecuación de balance de agua disponible en el suelo para el cultivo en paso diario (Andriani, 2012). En esta ecuación se utilizaron parámetros obtenidos en INTA Oliveros (Andriani, 1999, 2000, 2003, 2006; Dardanelli et al., 1991, 2010).

El aplicativo Bahicu fue desarrollado con la herramienta VisualBasic.net 2008 de Microsoft. Para almacenamiento de información se utilizó la base de datos Microsoft Access 2000. El software requiere de pocos datos de ingreso y brinda una salida gráfica del contenido de agua útil en el suelo explorado por las raíces del cultivo y datos complementarios para una mejor interpretación del estado hídrico. Es un software sencillo de manejar y con una visualización de fácil interpretación. Los datos simulados por la aplicación logran un buen ajuste con datos observados a campo, siendo el error promedio del 9% (Andriani, 2012).

De este modo el software permite conocer la disponibilidad hídrica diaria de un cultivo, parámetro de suma importancia en los sistemas agrícolas bajo riego suplementario, porque permite responder a las preguntas de ¿cuándo y cuánto regar? (Andriani, 2012).

A modo de ejemplo en las Figuras 2 y 3 se presentan los balances hídricos de un cultivo de maíz bajo riego en la provincia de San Luis en dos fechas de siembra 20 de octubre y 20 de noviembre respectivamente. Los datos meteorológicos utilizados son los del año meteorológico típico (TMY) de Villa Mercedes (Serie 1968–2012, que se presentan en el capítulo de Riego Deficitario de esta publicación, adaptado de Dominguez Padilla, 2013), se utilizaron los datos de la serie de suelos FRAGA (Peña Zubiato et al., 2000) sin influencia de napa. Para la simulación del balance hídrico en las dos fechas de siembra se priorizó regar para mantener el cultivo sin estrés hídrico durante el período crítico (de 60 a 90 días posteriores a la siembra) durante el resto del ciclo de cultivo se admitió un estrés hídrico moderado.

Comparando ambos balances se observa que se requieren 210 mm y 120 mm de riego para la siembra del 20 de octubre y 20 de noviembre respectivamente para que el maíz no evidencie estrés hídrico durante el período crítico. Si bien en la segunda fecha disminuye el rendimiento potencial (Maddonni, 2011), se prescinde de 90 mm de riego que de acuerdo a la fuente de agua y método de riego pueden tener una incidencia importante sobre el resultado económico del cultivo. Esto se debe a que el período crítico del cultivo tardío ocurre en febrero donde la E_t0 comienza a disminuir.



Figura 2. Balance hídrico (Bahicu 1.1) de maíz sembrado el 20 de octubre bajo condiciones agroclimáticas típicas de Villa Mercedes (S.L.).



Figura 3. Balance hídrico (Bahicu 1.1) de maíz sembrado el 20 de noviembre bajo condiciones agroclimáticas típicas de Villa Mercedes (S.L.).

5. Bibliografía

- Allen, R.G.; L.S. Pereira; D. Raes y M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration: Guide-lines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper N.o. 56. FAO, Italia.
- Andriani, J.M. 1999. Coeficientes de cultivo para soja de distinta época de siembra. Merco-soja 99, Resumen de trabajos y conferencias presentadas, Rosario, Argentina.
- Andriani, J.M. 2000. Crecimiento de las raíces de los principales cultivos extensivos en suelo Argiudoles de la provincia de Santa Fe. En: "Para mejorar la producción 13", El agua en los sistemas productivos, INTA Oliveros.
- Andriani, J.M. 2003. Crecimiento de las raíces de trigo, maíz y soja en suelos Hapludoles de la provincia de Santa Fe. Pp 15-18. En: "Para mejorar la producción 22", Trigo campaña 2002/03, INTA Oliveros.
- Andriani, J.M. 2006. Contenido de agua útil de los principales suelos Argiudoles y Hapludoles del sur de Santa Fe. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, I reunión de suelos de la región andina. Salta-Jujuy.
- Andriani, J.M. 2012. Balance Hídrico de Cultivos Extensivos, (BAHICU). INTA Oliveros. Disponible en: <http://inta.gob.ar/documentos/instructivo-del-software-balance-hidrico-de-cultivos-extensivos-bahicu/view>.
- Dardanelli, J.L.; E.E. Suero; F.H. Andrade y J.M. Andriani. 1991. Water deficits during reproductive growth of soybeans. II: Water use and water deficiency indicators. *Agronomie* 11: 747-753.
- Dardanelli, J.L.; I. Severina y J. Andriani. 2010. Funcionalidad de raíces y agua del subsuelo: Su rol en la optimización del riego suplementario. Pp 19-28. En: 1.er. Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas. Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas.
- Domínguez, A. 2012. Modelo de Optimización Económica del Riego. Universidad de Castilla-La Mancha, España. Disponible en: <http://crea.uclm.es/crea/sp/descarga.php>.
- Domínguez, A.; A. Martínez-Romero; K.N. Leite; J.M. Tarjuelo; J.A. de Juan y R. López-Urrea. 2013. Combination of typical meteorological year with regulated deficit irrigation to improve the profitability of garlic growing in Central Spain. *Agric. W. Manage.* 130: 154- 167.
- Maddoni, G.A. 2011. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural región of Argentina—a probabilistic approach. *Theor. Appl. Clim.* 107: 325–345.
- Peña Zubiarte, C.A. y A. d`Hiriart. 2000. Carta de Suelos de la República Argentina. Hoja Villa Mercedes, provincia de San Luis. INTA EEA San Luis–Gobierno de la provincia de San Luis.
- Seckler, D. 1996. The New Era of Water Resources Management. Research Report 1. Colombo, Sry Lanka: International Irrigation Managements Institute (JIMI). ISBN: 92-9090-325-2.
- Tarjuelo Martín-Benito, J.M. 1999. El Riego por Aspersion y su Tecnología. 2.da Edición. Ediciones Mundi-Prensa.

El riego deficitario controlado como una estrategia para incrementar la eficiencia en el uso del agua y la rentabilidad de los cultivos extensivos

Alfonso Domínguez Padilla¹, Angel Martínez-Romero¹, Marisa Garbero² y Claudio Saenz³

1. Introducción

Existen numerosos motivos para tratar de aumentar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura pudiendo establecerse tres grandes grupos. En primer lugar estarían los relacionados con el medio ambiente, dado que una mayor eficiencia en el uso del agua implicaría una menor presión sobre los recursos naturales y un menor impacto en el entorno. El segundo grupo estaría relacionado con la seguridad alimentaria, ya que la agricultura de regadío es la actividad que más agua consume a nivel mundial, siendo previsible un aumento de la demanda como consecuencia del crecimiento de la población, por lo que una mayor eficiencia permitiría producir mayor cantidad de alimentos con el mismo volumen de agua. Finalmente, el tercer grupo estaría relacionado con las actividades económicas ya que, en zonas de escasez de recursos hídricos, pueden producirse tensiones con otros sectores productivos que generalmente obtienen mayores beneficios con su uso, o donde la utilización del agua de riego lleva implícitos costes elevados que pueden condicionar la sostenibilidad económica de las explotaciones agrícolas. Por lo tanto, una mayor eficiencia en estos casos se traduciría en la liberación de recursos para otros usos y en menores costes de utilización.

Una de las principales actuaciones que pueden realizarse para tratar de mejorar la eficiencia en el uso del agua agrícola es la aplicación de riego deficitario. Esta técnica consiste en suministrar al cultivo una cantidad de agua inferior a las necesidades potenciales de este, con el fin de buscar el óptimo económico, y/o de eficiencia en el uso del agua, entre la cantidad de cosecha obtenida y el volumen de agua aplicado con el riego. Sin embargo, dado que la sensibilidad al déficit hídrico depende del estado fenológico en el que se encuentre la planta (Doorenbos y Kassam, 1979), para la misma cantidad de agua total de riego aplicada al cultivo el rendimiento será mayor si hubo menos estrés durante las etapas más sensibles, gracias a unas mayores restricciones de riego durante las etapas menos sensibles. A esta técnica se le denomina Riego Deficitario Controlado (RDC) (Jordan, 1983), siendo los principales aspectos a controlar la duración e intensidad del déficit hídrico impuesto durante determinados períodos del ciclo del cultivo para ahorrar agua, tratando de afectar al mínimo a la producción y/o a la calidad.

Numerosos trabajos han analizado los efectos del déficit hídrico en los cultivos. Sin embargo, y a pesar de los avances para controlar el nivel de estrés, las combinaciones de riego deficitario utilizadas en estos estudios no garantizan que no exista alguna otra combina-

¹ Universidad de Castilla la Mancha (Albacete, España); ² Universidad Nacional de San Luis; ³ INTA EEA San Luis.

ción de RDC diferente a las ensayadas que logre un mayor rendimiento para una misma cantidad de agua total neta aplicada.

Para solucionar el problema anterior surge la metodología ORDI (optimized regulated deficit irrigation o riego deficitario controlado optimizado). Su objetivo es determinar los niveles de déficit a aplicar en cada etapa de desarrollo de los cultivos herbáceos que logran el máximo rendimiento posible para un cierto nivel de déficit global objetivo (Domínguez et al., 2012b). Esta metodología requiere de un modelo de simulación de cultivos que permita determinar los rendimientos obtenidos para las distintas estrategias de riego deficitario, en las distintas etapas fenológicas establecidas por el modelo. En este caso, la Universidad de Castilla-La Mancha (España) a través del Centro Regional de Estudios del Agua (CREA) viene desarrollando desde hace años el modelo MOPECO (modelo para la optimización económica del agua de riego), cuya finalidad es lograr el máximo margen bruto de las explotaciones de regadío, mediante un uso más eficiente del agua de riego (de Juan et al., 1996). Este modelo resulta apropiado para la simulación de diferentes cultivos herbáceos en distintas zonas del mundo.

Finalmente, a la hora de tomar decisiones sobre la planificación de zonas regables es imprescindible disponer de datos climáticos suficientes, tanto en cantidad de variables medidas (especialmente aquellas relacionadas con la determinación de la evapotranspiración de referencia (ET_0) y la precipitación), como en un tamaño suficiente de las series que permita realizar análisis con un suficiente número de años. En este sentido, la utilización del año meteorológico típico (Hall et al., 1978) adaptado a la programación de riegos (Domínguez et al., 2013), puede ser de interés, ya que genera un año que representa las características típicas de toda la serie climática analizada. Esta simplificación permite, por ejemplo, determinar las necesidades de riego, la duración de las etapas de desarrollo, o la demanda de agua en una explotación bajo las condiciones típicas de la zona, sin necesidad de recurrir a la media de los resultados obtenidos para una serie de años concretos. En este capítulo se pretende poner de manifiesto que la utilización de técnicas de riego deficitario controlado puede ser de interés para zonas con escasez de recursos y/o altos costes asociados al uso del agua de riego, así como mostrar la existencia de modelos y metodologías que pueden ayudar al usuario a realizar un uso más eficiente del agua de riego. Para ello, se analiza de forma teórica cuál podría ser la repercusión de la aplicación de estas técnicas en la zona regable de San Luis (Argentina) sobre un cultivo de maíz.

2. La programación de riegos

La programación de riegos en los cultivos herbáceos puede plantearse con criterios muy diferentes entre los que cabe citar: 1) maximizar la producción por unidad de superficie regada; 2) maximizar la producción por unidad de agua aplicada; 3) maximizar el beneficio de la explotación agrícola; y 4) ahorrar o minimizar las necesidades energéticas. El objetivo de maximizar la producción se alcanza cuando se proporciona el agua suficiente a la planta para satisfacer diariamente la demanda evapotranspirativa (ET_m), manteniendo un alto potencial hídrico en el suelo. En los otros tres casos, y cuando exista escasez de recursos disponibles, siempre será necesario aplicar estrategias de riego deficitario.

Tradicionalmente los métodos de programación de riegos se han dividido en tres grupos:

1) conocimiento del estado hídrico en el suelo (principalmente por medio de sensores que informan de la humedad o potencial de agua en el suelo); 2) conocimiento del estado hídrico de la planta (de forma directa en la planta o mediante técnicas de teledetección); y 3) valoración del balance hídrico del conjunto suelo-planta-atmósfera. En este último grupo de métodos los más difundidos son los que tratan de establecer un balance hídrico en la unidad de cultivo cuya programación se pretende. Los aportes netos de agua se obtendrán como resultado del balance de entradas y salidas de agua en el sistema, siendo fundamental cuantificar la capacidad evapotranspirativa del cultivo (ET_m).

La estimación de los consumos máximos (ET_m) de los cultivos herbáceos mediante la metodología propuesta por FAO requiere conocer, por una parte, los valores de evapotranspiración de referencia (ET_o), y por otra, los valores del coeficiente del cultivo Kc durante el ciclo agronómico de este (Ec. 1).

$$ET_m = ET_o * Kc \quad (1)$$

Dónde: ET_m =evapotranspiración máxima del cultivo (mm); ET_o =evapotranspiración de referencia (mm); y Kc=coeficiente de cultivo (adimensional).

La ET_o suele estimarse a partir de los datos climáticos diarios registrados en estaciones agroclimáticas completas mediante la aplicación de la ecuación FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998). Los valores de Kc y la duración de las etapas dependen del cultivo y de la climatología de la zona en la que se desarrolle este. Doorenbos y Kassam (1979) ofrecen a modo orientativo y para algunos cultivos herbáceos valores de Kc entre 0,3-0,5 para la etapa inicial (establecimiento del cultivo), que llegan hasta 1,0-1,2 desde el final de la etapa de desarrollo vegetativo, hasta el inicio de la maduración (etapa media), y que disminuyen hasta 0,4-0,9 al alcanzar la maduración fisiológica (etapa de maduración). Estos valores deben adaptarse al tipo de cultivos y a las condiciones de cada zona.

A nivel de empresa agraria, para establecer una adecuada programación de riegos, instituciones como el Servicio Integral de Asesoramiento al Regante (SIAR) en España, recomiendan utilizar el método basado en los componentes del balance simplificado de agua, lluvia y evapotranspiración o consumo máximo del cultivo (ET_m) y contrastar los valores de humedad o potencial en el suelo. Para ello es fundamental conocer la evolución de la evapotranspiración del cultivo (ET_o) y cuantificar qué volumen de este consumo es suministrado por el agua de la lluvia, por las reservas del suelo y cuál es necesario completar con una aportación extra mediante el riego. A modo de ejemplo, la Figura 1 pretende poner de manifiesto la importancia de disponer de servicios de asesoramiento al regante que ayuden a los agricultores a realizar una correcta programación de riegos (<http://crea.uclm.es/siar/>). En esta figura se comparan las necesidades semanales de agua de un cultivo de maíz estimadas por el SIAR de Castilla-La Mancha, con la cantidad de agua puesta a disposición del cultivo (riego+precipitación efectiva) por un regante tipo siguiendo la metodología tradicional de la zona. Esta metodología consiste en establecer el número de horas de riego en función de la fecha y del estado hídrico visual del cultivo, sin realizar una estimación del consumo potencial de este (ET_m) ni considerar la verdadera aportación extra de agua en forma de lluvia.

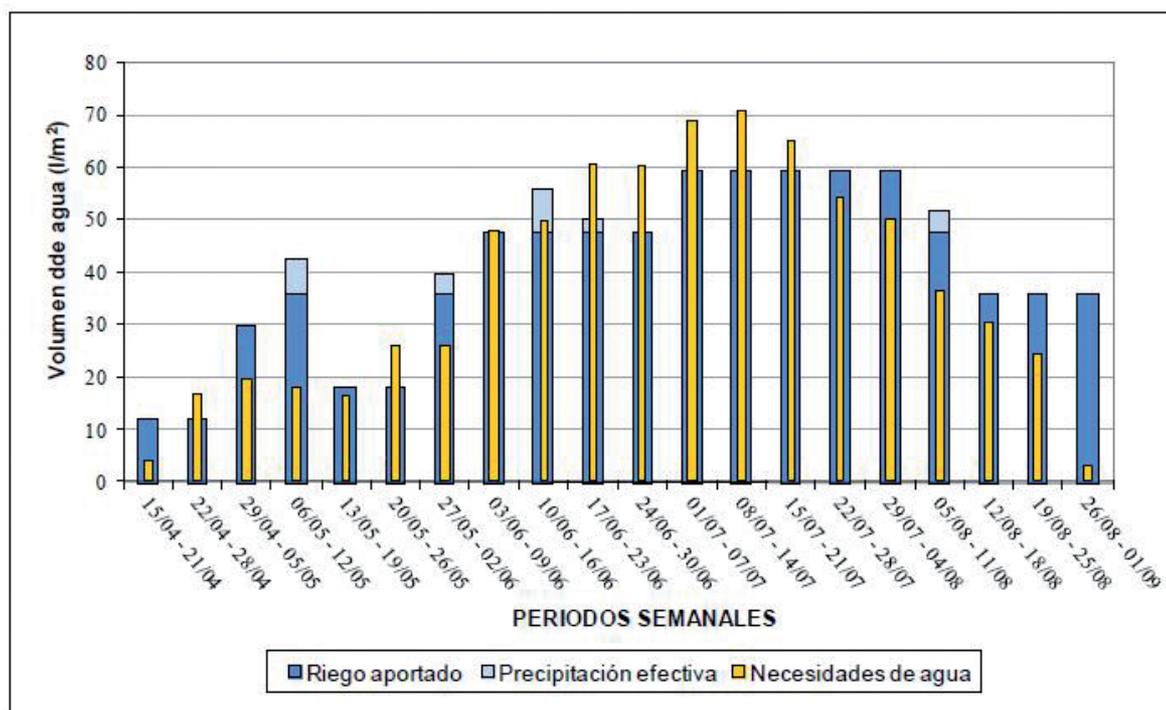


Figura 1. Consumos de agua máximos semanales de maíz grano frente a riegos aplicados más precipitación efectiva en Las Vegas de San Antonio (Toledo, España).

En el caso de estudio, con un manejo cuidadoso del riego, el volumen de agua aportado en toda la campaña se cifra entre un 10% y un 15% superior a las necesidades de riego estimadas por el SIAR (856 mm y 750 mm, respectivamente). Aunque los volúmenes acumulados no difieren en exceso, puede observarse un cierto desajuste en el reparto de estos, siendo frecuente aportar más agua de la necesaria durante las etapas de desarrollo vegetativo (hasta semana 10/06) y maduración (desde semana 22/07 hasta fin), y menos agua durante la etapa de mayores necesidades (floración y formación de grano), que es cuando el cultivo es más sensible al déficit hídrico. Por lo tanto, el déficit ocasionado durante estas fechas (15-20%), con toda seguridad repercutirá negativamente en el rendimiento y en la productividad del agua.

3. Aplicación de riego deficitario controlado en los cultivos extensivos

La aplicación de estrategias de riego deficitario sobre los cultivos extensivos se ha venido realizando desde la década de los 70 del siglo pasado. El principal objetivo de los primeros trabajos de investigación fue determinar cuáles eran las etapas del desarrollo de los cultivos más sensibles al déficit hídrico en términos de rendimiento y calidad de la cosecha obtenida. Así, es posible encontrar en la bibliografía numerosos trabajos de ensayos de riego deficitario aplicados a los principales cultivos del mundo. A continuación se recogen las principales conclusiones obtenidas para algunos de ellos:

Maíz

En función del déficit hídrico aplicado y de las etapas fenológicas afectadas, el rendimien-

to puede reducirse entre un 10 y un 75% (Rhoads y Bennet, 1990; Bolaños et al., 1993; Farré, 1998; Pandey et al., 2000; Karam et al., 2003; Çakir, 2004; Aguilar et al., 2007). El maíz es especialmente sensible al déficit hídrico durante la floración (NeSmith y Ritchie, 1992; Otegui et al., 1995; Farré y Faci, 2006), produciéndose una importante reducción del índice de cosecha cuando el estrés sucede en esta etapa (Sinclair et al., 1990; Liang et al., 1991; Andrade, 1995). Si el déficit afecta a la etapa de desarrollo vegetativo o al llenado del grano, los efectos sobre el rendimiento son notablemente menores (Shaw, 1974).

Soja

El componente del rendimiento más afectado por el déficit hídrico es el número de vainas por planta (Mingeau, 1974). Otros componentes como el número de semillas por vaina y peso medio del grano son generalmente menos afectados (Blanchet et al., 1977). Si la falta de agua se produce de manera uniforme durante todo el ciclo del cultivo, todos los componentes del rendimiento se ven afectados (Martens y Blanchet, 1981). En cambio, si se produce tardíamente, se perjudica el llenado de los granos, reduciendo el rendimiento. Por el contrario, un déficit precoz y poco prolongado puede provocar abortos y reducir el follaje (Pigeaire, 1984). Las plantas con estrés durante la floración redujeron el número de vainas, reduciendo el número de semillas, pero no su tamaño. Cuando el estrés se aplicó durante el llenado del grano, las plantas produjeron semillas más pequeñas, pero sin reducción de vainas ni de número de semillas (Sionit y Kramer, 1977). En términos de rendimiento, aplicar déficit hídrico durante la etapa de desarrollo vegetativo y mantener el cultivo libre de déficit desde la floración, no genera pérdidas de rendimientos apreciables comparado con un cultivo bien regado durante todo el ciclo (Ramseur et al., 1984). El déficit causado durante las etapas de formación y llenado de las vainas provoca una mayor pérdida de rendimiento que cuando el estrés se genera durante la inducción floral o la floración (Sionit y Kramer, 1977).

Cebolla

Para lograr el máximo rendimiento es necesario evitar el déficit hídrico, especialmente durante la bulbificación, ya que puede provocar, además de un menor rendimiento, una reducción en el tamaño de los bulbos (Shock et al., 2000; Martín de Santa Olalla et al., 2004; Kadayifci et al., 2005; Bekele y Tilahun, 2007). Durante los períodos vegetativo y de maduración, el cultivo es menos sensible al estrés por falta de agua (Shock et al., 2000; Kadayifci et al., 2005; Bekele y Tilahun, 2007), aunque un exceso de riego durante las etapas de establecimiento y desarrollo vegetativo pueden provocar un retraso en el inicio de la bulbificación y un menor desarrollo de los bulbos. Los tratamientos que recibieron mayores dosis de Riego durante las etapas de desarrollo y maduración, cosecharon un mayor porcentaje de bulbos grandes, mientras que la falta de agua durante la bulbificación provocó un alto porcentaje de bulbos pequeños (Martín de Santa Olalla et al., 2004). Por otro lado, el riego deficitario también puede afectar a las condiciones de almacenamiento de los bulbos, de tal manera que no es recomendable causar estrés durante largos períodos, especialmente durante la última etapa, si se pretende almacenar las cebollas tras la cosecha (Kumar et al., 2007; Rattin et al., 2011).

Melón

En este cultivo, la etapa más sensible es la floración. Durante la formación de los frutos, el déficit hídrico puede reducir el rendimiento final y el contenido en azúcares, mientras que causar estrés durante la etapa de maduración incrementa el contenido en azúcares

(Fabeiro et al., 2002). El peso de los frutos es más sensible al déficit hídrico que el número de frutos (Long et al., 2006; Dogan et al., 2008; Cabello et al., 2009).

Como conclusiones de estos ejemplos, puede decirse que en general las etapas más sensibles y en las que por tanto debe evitarse o atenuarse lo máximo posible el déficit hídrico, son las relacionadas con la reproducción y/o la formación de la cosecha. Por lo tanto, las mejores etapas para ahorrar agua serán aquellas relacionadas con el desarrollo vegetativo y la maduración. Sin embargo, también deben evitarse altos niveles de déficit durante el establecimiento de los cultivos con el fin de lograr un adecuado desarrollo vegetativo.

4. Optimización del riego deficitario controlado con el modelo MOPECO

El objetivo de MOPECO es maximizar el margen bruto (MB) de las explotaciones a través de un uso eficiente del agua de riego. Para la simulación de la función de producción optimizada “Rendimiento vs. Agua neta total=riego neto (I_N)+precipitación efectiva (P_e)” ($Y-TW_N$) es necesario un conjunto de datos que permitan la simulación de cada cultivo bajo las condiciones climáticas de un año concreto. Para obtener esta función, el modelo simula un rango de calendarios de riego deficitario obtenidos mediante la técnica ORDI (Domínguez et al., 2012b), teniendo en cuenta el efecto de la uniformidad del sistema de riego (López-Mata et al., 2010) y la conductividad eléctrica del agua utilizada (Domínguez et al., 2011) sobre el rendimiento. La función $Y-TW_N$ es traducida a “Rendimiento vs. Agua bruta total=riego bruto (I_G)+ P_e ” ($Y-TWG$) para incluir la eficiencia de aplicación del sistema de riego. La función MB-TWG se calcula utilizando un conjunto de datos económicos asociados al cultivo. Finalmente, el modelo calcula la distribución óptima de cultivos que cumple las restricciones impuestas por el usuario del modelo (Figura 2).

Dónde: ET_0 : evapotranspiración diaria de referencia (mm); P_e : precipitación efectiva diaria (mm); EC_{ei} : conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo al inicio de la campaña de riegos ($dS\ m^{-1}$); Y_m : rendimiento potencial del cultivo en la zona ($kg\ ha^{-1}$); K_c : coeficiente del cultivo (adimensional) (Allen et al., 1998); K_y : factor de respuesta del cultivo por etapa de desarrollo del cultivo (adimensional) (Doorenbos y Kassam, 1979); EC_{et} : conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo que reduce la capacidad evapotranspirativa del cultivo ($dS\ m^{-1}$); grupo de ET: condiciona el valor diario de la fracción del agua total disponible (TAW) que un cultivo puede extraer sin sufrir estrés por déficit hídrico (Danuso et al., 1995); CU: coeficiente de uniformidad del sistema de riego (%); EC_{iw} : conductividad eléctrica del agua de riego en la zona ($dS\ m^{-1}$).

La versión on-line del modelo se encuentra disponible en www.mopeco.uclm.es pero requiere de la introducción de datos calibrados y validados de un número suficiente de cultivos para que pueda ser operativo en una zona regable concreta. De esta manera, los usuarios solo tienen que introducir los datos particulares de sus explotaciones y seleccionar aquellos cultivos con los que deseen llevar a cabo la simulación, simplificando en gran medida la utilización del modelo. En este sentido, se está tratando de implementar este modelo en las principales zonas regables de Castilla-La Mancha (España). Para lograrlo, es necesaria la selección de los cultivos más relevantes de la zona y su posterior calibración que permita simularlos con MOPECO. En estos momentos, los cultivos calibrados son el maíz (Domínguez et al., 2012a), la cebolla (Domínguez et al., 2012c), el ajo (Domínguez

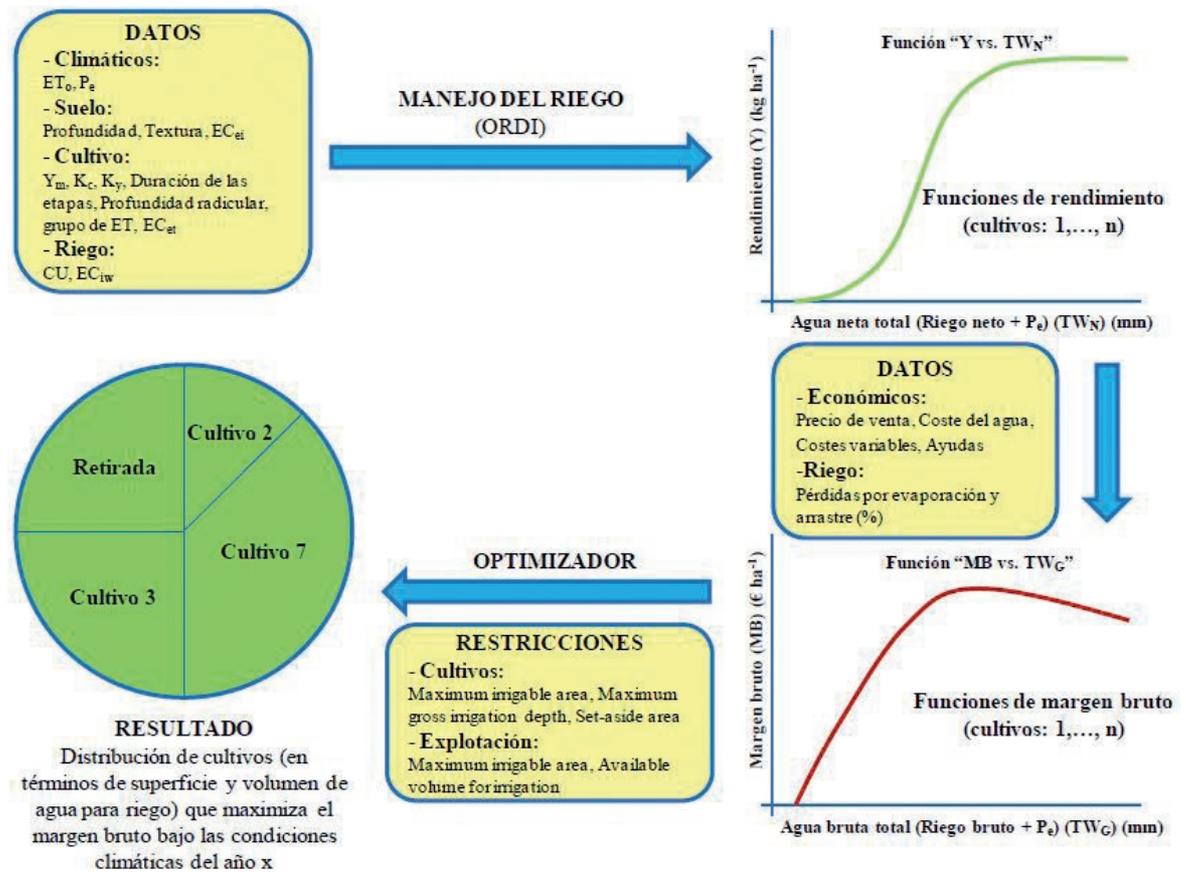


Figura 2. Diagrama de flujo del modelo MOPECO

et al., 2013) y el melón (Leite et al., 2014), estando en proceso de calibración el trigo, la cebada y el brócoli. Por otro lado, en otras zonas regables del mundo también se está calibrando el modelo con el fin de ofrecer esta herramienta a otras comunidades de regantes (Ceará y Río de Janeiro en Brasil, País Vasco en España, Valle del Bekaa en El Líbano, y San Luis en Argentina).

El modelo está basado en la metodología FAO y necesita calibrar tres coeficientes para la adecuada simulación de los cultivos (Domínguez et al., 2012a): el rendimiento potencial del cultivo en la zona (Y_m), el coeficiente de cultivo (K_c) (Allen et al., 1998) y el coeficiente de sensibilidad al estrés (K_y) (Doorenbos y Kassam, 1979). El valor de K_c varía durante cuatro etapas bien definidas (establecimiento, desarrollo vegetativo, etapa media y etapa final) y permite determinar las necesidades potenciales hídricas diarias del cultivo multiplicando este valor por el de la evapotranspiración de referencia (ET_o). Por otro lado, el K_y indica cuán sensible es el cultivo al estrés durante las distintas etapas de desarrollo de este. Para el caso del maíz, se consideran cuatro etapas de sensibilidad al estrés (período vegetativo, floración, formación de la cosecha y maduración). Para otros cultivos como la cebolla, en los que la floración no ocurre durante la campaña comercial del cultivo, solo se consideran las otras tres etapas. La Figura 3 muestra los valores de K_c y K_y para un cultivo de maíz en las distintas etapas de desarrollo, así como el momento en el que se produce el cambio de etapa. Puede observarse como la máxima sensibilidad al estrés del maíz (K_y

(II): floración) comienza antes de alcanzarse el período de máximas necesidades hídricas (K_c (III): etapa media) y esta se reduce una vez que comienza la formación del grano (K_y (III)). Del mismo modo, puede observarse como la etapa menos sensible al estrés es durante la maduración (K_y (IV)).

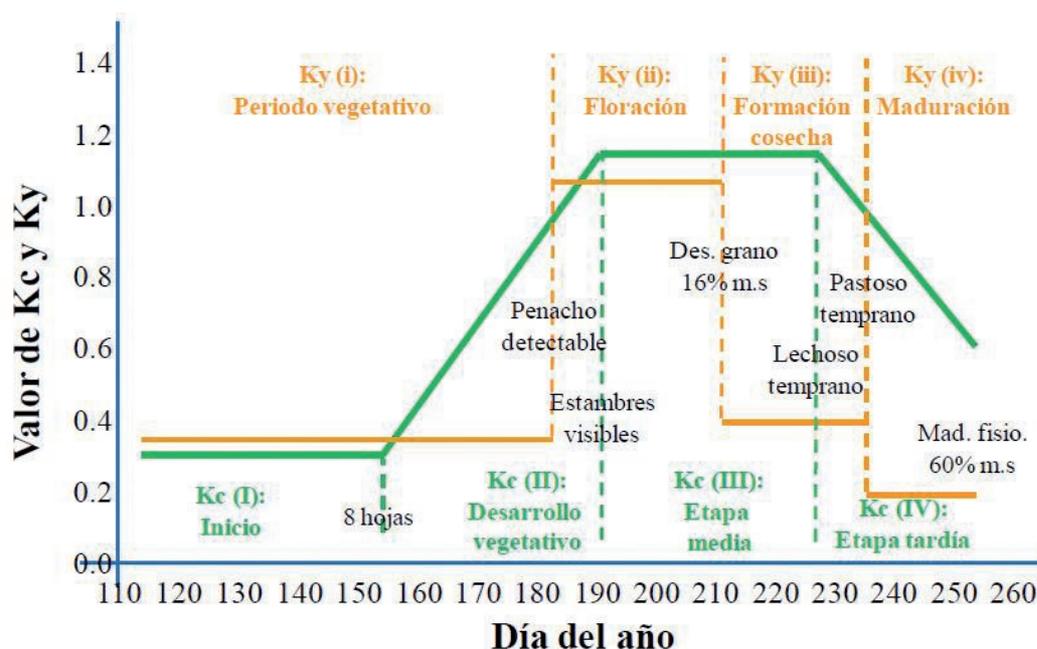


Figura 3. Valores de K_c y K_y para un cultivo de maíz ciclo 700 a lo largo de su ciclo de desarrollo bajo las condiciones de Castilla-La Mancha (España).

La metodología ORDI calcula para cada una de las etapas de K_y del cultivo, la relación ET_a/ET_m , es decir, la relación entre la cantidad de agua que debe evapotranspirar el cultivo y la que podría llegar a transpirar si tuviera agua suficiente en el suelo, que lograría el máximo rendimiento para una cierta relación ET_a/ET_m global objetivo. Después, el modelo MOPECO determina el calendario de riegos que trataría de alcanzar dichos niveles de déficit objetivos por etapas. Por supuesto, es muy probable que el modelo no sea capaz de alcanzar exactamente el nivel de déficit objetivo en cada etapa, ya que hay condicionantes como la disponibilidad de agua en suelo y la lluvia que pueden provocar alteraciones.

A modo de ejemplo supongamos que se pretende ahorrar un 20% de agua de riego aportando a un cultivo de maíz el 80% de sus necesidades hídricas, o lo que es lo mismo, lograr una relación entre la evapotranspiración real (ET_a) y la potencial (ET_m) de 0,8, bajo las condiciones climáticas de Castilla-La Mancha. En este caso, el módulo de optimización del riego deficitario controlado primero debe determinar el nivel de déficit que debe alcanzarse en cada una de las etapas de desarrollo del cultivo para lograr el máximo rendimiento para ese nivel de estrés global. En este caso, los niveles de déficit objetivo serían 0,8 durante la etapa de establecimiento (la etapa K_y (i) se divide en dos, la de establecimiento que coincide con K_c (i) y la de desarrollo vegetativo (K_y (i')) hasta el inicio de la floración (K_y (ii))), con el fin de evitar un estrés excesivo que pudiera afectar a la nacencia del cultivo, y 0,7 durante K_y (i'). Para la etapa de floración (K_y (ii)) el modelo determinó que lo ideal sería

no provocar déficit, por lo tanto $ET_a/ET_m=1$ durante esa etapa. Para la etapa de formación de cosecha el modelo calculó una ET_a/ET_m objetivo=0,76, mientras que para la etapa de maduración el valor de ET_a/ET_m objetivo fue 0,55. Por lo tanto, las etapas en las que el cultivo sufrirá un mayor estrés por déficit hídrico serán las de desarrollo vegetativo y maduración, evitando el déficit durante la floración. Esta estrategia coincide con lo propuesto por otros autores, según el apartado anterior. La Figura 4 muestra una comparativa entre el calendario de riegos generado por MOPECO cuando trata de alcanzar las relaciones ET_a/ET_m objetivo propuestas por ORDI (a) y un riego deficitario constante por etapas (b), en el que el objetivo es mantener al cultivo con una relación $ET_a/ET_m=0,8$ en todas sus etapas de desarrollo.

Como puede observarse, durante la primera etapa el modelo no consigue alcanzar el nivel de déficit objetivo (0,8) (indicado por la línea negra discontinua) en ninguno de los dos casos. Para que la planta sufra estrés por déficit hídrico el contenido de humedad en la zona radicular (línea negra) debe estar por debajo del nivel de agotamiento permisible (línea gris). Como esto no sucede, la relación ET_a/ET_m acumulada en ambos casos se mantiene en 1, es decir, sin estrés por déficit. La falta de estrés es debida a dos motivos. En primer lugar, el contenido inicial de agua en el suelo es alto (se ha considerado un 75% del agua útil, 0,75 en tanto por uno, donde 1 es capacidad de campo y 0 punto de marchitamiento), que junto con las lluvias ocurridas y los riegos que se aplican al maíz para evitar la formación de costra y humedecer la capa más superficial del suelo, han mantenido el suelo con un contenido de humedad relativamente alto (termina la etapa con un 70% de agua útil). En segundo lugar, dado que todavía las condiciones climáticas en esa etapa son frescas (abril-mayo) y las necesidades del cultivo tampoco son altas, el nivel de agotamiento permisible es bastante elevado, ya que debe agotarse en torno al 90% del agua útil para que el cultivo entre en estrés.

En la segunda subetapa (K_y (i')), debido a la ausencia de lluvias y a un aumento de las necesidades del cultivo y de la demanda evaporativa de la atmósfera por mayores temperaturas, el modelo consigue causar estrés al cultivo gracias a aplicar unos riegos por debajo de las necesidades de este. Como puede observarse, los riegos en el caso (a) son de menor cuantía que en el (b), pues el objetivo de déficit es mayor en el primero (0,7) que en el segundo (0,8). En esta ocasión, el objetivo de déficit es alcanzado en los dos escenarios.

Durante la floración (K_y (ii)), ORDI determina que el cultivo no debe padecer estrés en el tratamiento optimizado (a), por lo que el modelo aplica una serie de riegos de mayor cuantía que en (b) (que debe mantenerse en $ET_a/ET_m=0,8$) para recuperar el contenido de humedad del suelo y mantenerlo por encima del nivel de agotamiento permisible. Obviamente, al salir de una situación de déficit no es posible alcanzar el valor de 1 en toda la etapa, pero se queda muy cerca.

En las dos últimas etapas el modelo debe mantener el nivel de déficit establecido, aplicando como era de esperar menos agua en el escenario (a) que en el (b) para compensar el exceso de agua aplicado en (a) durante la fase de floración. Así, en el escenario del riego deficitario constante por etapas (b) se consigue alcanzar 0,8 al final de cada etapa, y en el escenario ORDI se alcanzan alrededor de 0,76 y 0,55 que eran los objetivos establecidos *a priori*.

Al final de la simulación y comparando las dos estrategias de riego, ambas aplicaron una cantidad similar de agua de riego (413,9 mm en (a) frente a 413,7 mm en (b)). Sin embargo, el rendimiento fue diferente, consiguiendo 14.711 kg ha⁻¹ en el primer caso y 12.936 kg ha⁻¹ en el segundo, lo que implica una mejora del 14% para el tratamiento optimizado.

Este ejemplo pone de manifiesto que los modelos de ayuda a la toma de decisiones como MOPECO pueden ofrecer información relevante sobre las estrategias de riego a aplicar en las zonas regables. Es preciso indicar que de los cultivos analizados hasta la fecha en la zona de Castilla-La Mancha (maíz, cebada, cebolla, ajo y melón) los cereales y el melón son los que presentan los mayores potenciales de mejora de rendimiento frente a un riego deficitario constante por etapas, con valores que pueden superar el 20% para niveles de déficit global objetivo entre el 0,7 y el 0,8 de ET_a/ET_m . Sin embargo, la potencialidad del ajo y de la cebolla es bastante inferior (alrededor del 8-10%), justificando la utilización de esta técnica el hecho de generar unos márgenes brutos muy superiores a los cereales.

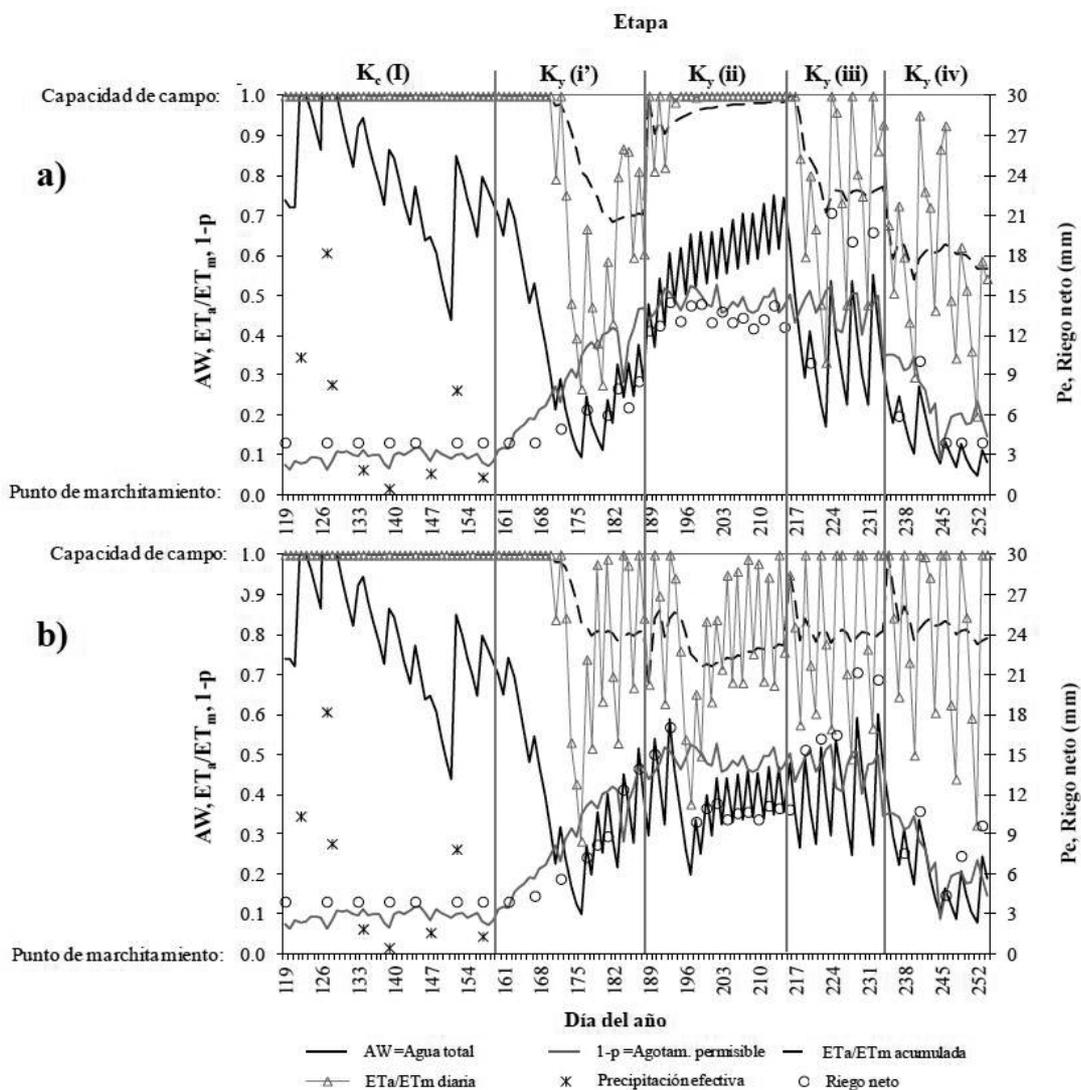


Figura 4. Comparativa entre el calendario de riegos, la evolución del contenido de humedad del suelo y los niveles de estrés por déficit hídrico por etapas de un cultivo de maíz utilizando la metodología ORDI (a) y un riego deficitario constante por etapas (b).

5. El cultivo del maíz en Argentina

El maíz es la planta agrícola con mayor superficie cultivada en el mundo. Según FAO se cultiva en 168 países que se distribuyen en todos los continentes, con un aumento progresivo de superficie. Entre 2000 y 2008, la producción mundial de maíz creció un 39% y llegó a 822 millones de toneladas, y las estimaciones para la campaña 2010/11 ascienden a una producción de 845 millones de toneladas. Estados Unidos es el principal país productor, seguido de China y la Unión Europea (Tabla 1).

Argentina es el sexto país productor del mundo, y el segundo en rendimiento, y aunque en las tres últimas décadas, la superficie disminuyó un 20%, durante los últimos años, la tendencia se ha invertido, lo que unido al aumento de los rendimientos hace que la producción haya aumentado un 25% en diez años (Tabla 1). En la última década se ha producido un aumento progresivo de la superficie cultivada. Según la Bolsa de Cereales de Buenos Aires, la superficie sembrada en la campaña 2013/2014 se estima en 3,56 millones de hectáreas, inferior a los 3,68 millones cultivados en la temporada anterior, que con 24,8 millones de toneladas se considera la mayor de la serie histórica.

Tabla 1. Producción mundial de maíz por países y rendimientos medios

País	Producción campaña 2010/11 (millones de t)	Ratio mundial	Variación 2000/2010	Rendimientos (kg ha ⁻¹)
Estados Unidos	303	39,9 %	+ 35 %	9.339
China	138	18,2 %	+ 56%	5.090
UE-27	56	7,8 %	~	7.220
Brasil	45,6	6,0 %	+ 79%	3.500
México	21,3	3,0 %	+ 39%	2.800
Argentina	17,4	2,5 %	+ 25%	6.700 – 8.400

Fuentes: Asociación Maíz Argentino (MAIZAR); Comisión Europea (MEMO/10/361); Procuraduría Agraria (Estadísticas del gobierno de México).

El 75% de la superficie de la República Argentina posee ecosistemas con características propias de zonas áridas y semiáridas (Nieto et al., 2002). Así, en la mayor parte de las regiones agrícolas de Argentina suele haber déficit hídrico en momentos claves. Esto significa que cuando se hace efectiva la lluvia ya suele ser tarde para el cultivo, lo que provoca disminución en los rindes. Por ejemplo, si el maíz no dispone de suficiente cantidad de agua durante la floración, el rendimiento final se verá severamente afectado. En Córdoba se ha logrado incrementar el rendimiento en 52 y 46% con la aplicación de 156 y 119 mm de riego en momentos estratégicos en maíces de 1.º y 2.º respectivamente (Salinas et al., 2012).

De este modo, aunque es posible cultivar maíz en secano, el riego ofrece estabilidad a la empresa agropecuaria, reduciendo la variabilidad anual de los rendimientos a un 15%, mientras que en secano el riesgo productivo asciende al 50%. El riego permite duplicar el rendimiento de los principales cereales y oleaginosas en el área central (Dardanelli, 1994). Ensayos realizados durante 16 años por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) indican además que en el caso del maíz el rendimiento promedio es de 12000 kg

ha⁻¹ para sistemas bajo riego frente a 7800 kg ha⁻¹ en el sistema tradicional en seco, y en trigo llega a duplicarse (2200 kg ha⁻¹ vs. 5300 kg ha⁻¹) (Salinas et al., 2012).

Según estimaciones del Programa de Servicios Agrícolas Provinciales (PROSAP) (<http://www.prosap.minagri.gov.ar/>) sería posible incorporar 16 millones de hectáreas de nuevas tierras de cultivo (44% de ellas en zonas áridas y 56% en húmedas). El riego estratégico puede lograr duplicar y hasta triplicar la producción que se obtiene en seco, debido a que la falta de una precipitación estratégica puede determinar hasta la pérdida total de un cultivo comercial (Zuleta, 2013). Por todo ello es necesario disponer de herramientas que permitan conocer las necesidades hídricas de los cultivos en cada etapa de desarrollo fenológico de estos para que el regadío sea viable tanto medioambiental como económicamente.

6. Ejemplo de aplicación del riego deficitario controlado optimizado para un cultivo de maíz en Villa Mercedes, San Luis (Argentina)

Las simulaciones de riego se realizaron con MOPECO utilizando datos de profundidad y capacidad de retención hídrica del suelo típico de la zona, el rendimiento potencial del cultivo en la zona (Y_m), el coeficiente de cultivo (K_c) (Allen et al., 1998) y el coeficiente de sensibilidad al estrés (K_y) (Doorenbos y Kassam, 1979). Además, se construyó el Año Meteorológico Típico (TMY, por sus siglas en inglés) (Hall et al., 1978) seleccionando como variables climáticas la evapotranspiración de referencia, la precipitación, la temperatura máxima y mínima con datos históricos de 45 años proporcionados por la Estación Meteorológica "INTA Villa Mercedes". Un año meteorológico típico está formado por 12 meses concatenados de años individuales, estadísticamente seleccionados para reproducir las condiciones típicas de la zona. En las Tablas 2 y 3 se presentan la evapotranspiración de referencia diaria y las precipitaciones diarias respectivamente del año meteorológico típico para Villa Mercedes. El TMY se utiliza generalmente para el dimensionamiento de sistemas de control climático industrial, siendo utilizado en la agricultura para el diseño de invernaderos. Dado el interés que implica utilizar datos climáticos inalterados en los que existe una perfecta correlación entre las variables climáticas diarias (por ejemplo, si un día llovió probablemente la ET_0 y la temperatura fueron inferiores al día anterior en el que no llovió), Domínguez et al. (2013) modificaron esta metodología para aplicarla a la programación de riegos. En este apartado se encuentran resultados preliminares de las simulaciones con MOPECO, la obtención de datos más precisos requerirá de la calibración y validación del modelo.

Tabla 2. Evapotranspiración de referencia diaria (mm) del año meteorológico típico.

	<i>Ene</i> <i>1986</i>	<i>Feb</i> <i>1991</i>	<i>Mar</i> <i>2005</i>	<i>Abril</i> <i>2006</i>	<i>May</i> <i>1986</i>	<i>Jun</i> <i>2000</i>	<i>Jul</i> <i>1972</i>	<i>Agos</i> <i>1994</i>	<i>Sep</i> <i>1974</i>	<i>Oct</i> <i>1980</i>	<i>Nov</i> <i>1983</i>	<i>Dic</i> <i>1980</i>
1	5,78	6,64	4,18	3,49	2,95	1,54	0,67	2,29	2,53	3,30	4,97	6,64
2	6,69	5,29	4,76	2,89	2,70	1,82	0,83	1,73	2,96	4,00	4,97	6,61
3	5,75	7,07	5,20	3,24	2,37	2,02	1,57	2,54	3,31	4,40	6,26	7,25
4	6,93	4,47	5,70	3,04	2,84	2,05	1,76	2,87	1,59	4,90	6,93	5,54
5	6,67	5,05	3,56	1,67	1,90	1,20	1,53	2,99	0,80	5,25	6,73	7,01
6	7,06	6,03	5,86	2,61	1,68	1,15	1,23	3,16	1,58	4,60	1,56	5,41
7	6,01	5,84	2,61	3,40	2,42	1,81	1,15	0,98	1,54	3,28	5,94	7,43
8	6,57	4,28	3,32	2,55	2,67	2,02	1,56	1,35	2,22	4,74	6,49	7,52
9	7,59	6,30	4,96	3,25	1,80	1,72	1,76	1,97	2,66	5,35	3,23	5,86
10	7,23	3,99	5,08	3,49	2,36	1,56	2,24	2,79	3,22	4,05	5,48	8,43
11	7,52	5,25	4,78	3,55	1,72	1,95	2,24	3,17	3,39	4,73	2,30	6,02
12	4,53	5,93	2,65	3,52	1,78	1,69	1,22	2,17	2,73	5,51	4,34	6,97
13	6,08	2,04	4,40	1,78	1,53	2,28	1,64	1,97	3,30	5,87	4,19	5,43
14	6,50	4,97	5,23	2,10	1,96	1,54	1,47	1,58	3,80	5,91	5,28	6,26
15	6,54	5,94	5,17	2,53	2,03	0,81	1,62	2,07	4,23	6,31	6,33	6,34
16	3,23	5,52	5,07	2,86	1,38	0,82	1,84	2,46	4,50	5,01	5,88	8,11
17	3,39	4,59	3,71	3,02	1,31	0,75	1,65	2,51	3,67	3,63	4,71	6,11
18	5,66	6,11	4,06	2,75	2,14	0,72	1,85	2,45	3,86	3,99	5,67	4,33
19	5,51	5,16	4,56	3,44	1,85	1,20	1,08	1,84	4,24	4,19	6,54	4,34
20	5,94	4,80	4,63	2,57	2,44	1,42	0,79	2,58	4,62	3,27	3,53	5,58
21	7,23	5,89	3,35	2,84	2,49	1,60	1,42	2,54	4,71	3,19	3,90	6,59
22	7,67	5,70	4,01	3,58	2,40	1,75	2,16	1,92	4,69	2,84	6,60	6,98
23	7,68	5,93	4,83	3,88	2,19	1,47	1,90	2,74	4,01	3,03	7,11	7,56
24	5,34	6,66	5,07	3,73	1,60	1,62	2,04	3,03	3,93	3,87	4,80	7,65
25	7,95	6,36	4,82	2,80	2,21	1,64	2,04	2,03	3,35	4,92	6,60	6,00
26	5,60	6,76	4,84	3,95	2,63	1,94	2,55	2,90	4,13	5,36	6,01	6,99
27	2,67	2,87	1,70	3,83	2,37	1,84	2,02	3,22	4,01	5,04	7,22	4,98
28	4,99	4,22	3,55	3,39	1,66	1,62	1,92	3,34	2,95	5,96	6,89	7,22
29	6,08	-	3,39	2,71	1,59	1,54	2,13	1,09	2,99	3,41	7,32	5,50
30	6,15	-	2,62	2,60	2,05	2,25	2,44	1,26	3,45	4,43	5,09	5,89
31	3,80	-	2,99	-	2,40	-	2,12	0,46	-	5,33	-	3,86

Tabla 3. Precipitación diaria (mm) del año meteorológico típico.

	<i>Ene</i> <i>1986</i>	<i>Feb</i> <i>1991</i>	<i>Mar</i> <i>2005</i>	<i>Abril</i> <i>2006</i>	<i>May</i> <i>1986</i>	<i>Jun</i> <i>2000</i>	<i>Jul</i> <i>1972</i>	<i>Agos</i> <i>1994</i>	<i>Sep</i> <i>1974</i>	<i>Oct</i> <i>1980</i>	<i>Nov</i> <i>1983</i>	<i>Dic</i> <i>1980</i>
1	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	11,8	0	0	7,7	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	17,4	0	0	0	0	0	0	0,4	0	0	0,4
5	0	0	0	0,2	0	0	0	0	11	0	0	0
6	0	0	0,2	32,5	0	0	0	0	12,2	0	14	13
7	0	0	34,6	0	0	0	0	0,3	0	0	7,6	0
8	0	1	0	30	0	0	0	21,5	0	0	0	0
9	0	0	0	0	3,4	0	0	0	0	0	0	1,3
10	0	5,6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
11	0	6,4	0	0	0	0	0	0	0	0,5	9	0
12	0	0	45	0	0	0	0	0	0	0	12	0
13	0	5,3	3,4	2,2	0	0	0	0	0	0	0	16,5
14	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	1,1	0	0	0	0	0	0
16	65	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0
17	7,1	0,6	3,8	0	0	0	0	0	0	38,6	16,6	0,7
18	0	0	0,4	0	0	0	0	0	0	2,2	0	0
19	0	17,6	0	0	0	0	0	0	0	2,8	0	0,4
20	0	0	0	0	0	0	13	0	0	19,5	0	0,2
21	0	0	1,8	0	0	0	0	0	0	4,4	6,8	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	42	0	0	0
24	0	0	0	0	6,8	0	0	0	15	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,8
26	6,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	3,7	38,3	3,0	0	0	0	0	0	0	0	0	12,1
28	29	3,5	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	5,3
29	0,6	-	0	0	0	0	0	0	0	14,7	0	12,8
30	0	-	5,8	0	0	0	0	0	0	0	3,3	0
31	0	-	0,2	-	0	-	0	7,2	-	0	-	36,3

A continuación se presentan los resultados obtenidos en dos fechas de siembra utilizando estrategias de riego para el cultivo de maíz en Villa Mercedes, provincia de San Luis. Es importante destacar que el modelo MOPECO considera que el cultivo no presenta restricciones de nutrientes que puedan afectar el desarrollo e influir en la producción de grano.

En las figuras se pueden observar dos líneas verticales que indican la floración del cultivo de maíz, es decir que entre estas líneas se produce el período crítico donde es aconsejable que las plantas no sufran estrés. La línea discontinua bordó representa el nivel de déficit y la línea verde indica el nivel de agotamiento permisible, denominada como 1-p

en las gráficas. La línea negra es el contenido de humedad en la zona radicular, cuando hay percolación la línea sobrepasa la escala de las gráficas (eje Y) ya que se supera el valor de capacidad de campo. El aporte de agua en las gráficas está representado por las precipitaciones (asteriscos) y el riego neto en círculos azules (el riego neto y las pérdidas por evaporación y arrastre constituyen el riego bruto). En las simulaciones se dispusieron riegos netos de 8, 12, 20 o 25 mm.

Para la fecha de siembra 1.º de noviembre se estableció un rendimiento potencial de 15000 kg ha⁻¹ y en primera instancia se simuló el comportamiento del cultivo de maíz con las condiciones ambientales de la región sin aplicación de riego (Figura 5a). En la figura se observan períodos de estrés hídrico, que durante el desarrollo vegetativo llegan a puntos cercanos al marchitamiento en algunos días. Además existe déficit de agua en floración y este se incrementa paulatinamente hasta el día 120 desde la siembra. Dado que la planta experimenta estrés hídrico durante el período de mayor sensibilidad (floración) el rendimiento es afectado y bajo estas condiciones el modelo simula un rendimiento de 8693 kg ha⁻¹ (Figura 5a, Tabla 4).

Posteriormente se evaluaron dos estrategias de riego:

- 1- aplicación de agua mediante el seguimiento teórico de la humedad del suelo;
- 2- riego deficitario.

Con la estrategia de riegos aplicados cuando el suelo presenta déficit de humedad (estrategia 1) se obtiene el rendimiento potencial, debido al gran aporte de agua realizado. Sin embargo este tipo de manejo presenta como desventaja el riesgo de que se produzcan pérdidas de agua por percolación cuando se producen lluvias importantes, principalmente en desarrollo vegetativo (Figura 5b).

El manejo de los riegos aplicando déficit hídrico (estrategia 2) en desarrollo vegetativo y en formación del grano permite lograr una mayor eficiencia en el uso del agua al reducir las pérdidas por percolación. Con esta estrategia, se ahorraron 48 mm respecto a los riegos de acuerdo a la humedad edáfica y se logra mantener al cultivo sin déficit de humedad en el período crítico, alcanzando un rendimiento teórico de 14.719 kg ha⁻¹ (Figura 5c, Tabla 4). Comparativamente, con este tipo de manejo del recurso hídrico se consiguen altas eficiencias en el uso del agua de riego (rendimiento/riego) y en el uso del agua total (rendimiento/riego+precipitaciones), respecto a la estrategia 1 (Tabla 4).

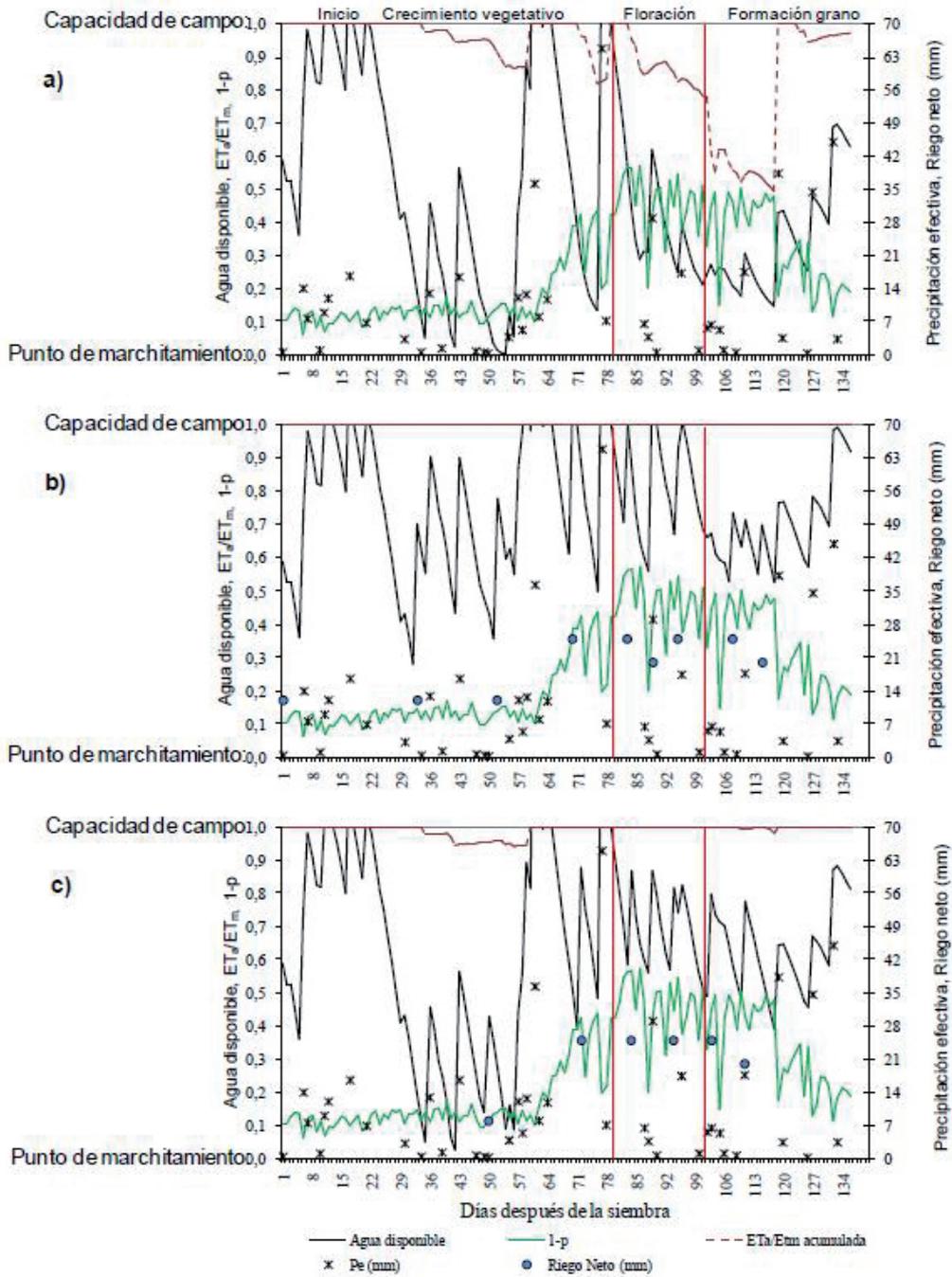


Figura 5. Comparativa entre el calendario de riegos, la evolución del contenido de humedad del suelo y los niveles de estrés por déficit hídrico: sin riego (a), seguimiento teórico de la humedad edáfica (b) y riego deficitario (c) en un cultivo de maíz sembrado el 1.o de noviembre en Villa Mercedes.

Tabla 4. Rendimiento y consumo de agua con dos estrategias de riego en maíz sembrado el 1° de noviembre.

Fecha de siembra	1° de Diciembre		
	Sin riego	Seguimiento de la humedad	Deficitario
Rendimiento (kg ha⁻¹)	10.434 (88%)	13.000 (100%)	12.959 (99%)
Riego neto (mm)	-	76	43
Número de riegos	-	5	3
Uso del agua de riego	-	171	301
Eficiencia en el uso del agua total	26	27	29

En la zona de Villa Mercedes es frecuente que los productores retrasen la fecha de siembra con el objetivo de lograr que el cultivo comience su ciclo con mayor cantidad de agua en el perfil e intentando que el período crítico ocurra durante febrero con días de menor demanda atmosférica. Basándose en esto se simuló con MOPECO el comportamiento del cultivo de maíz en secano con fecha de siembra 1° de diciembre. En coincidencia con los resultados obtenidos en la fecha de siembra temprana (1° de noviembre), en secano se presenta déficit hídrico durante el desarrollo vegetativo, sin embargo la disminución de la humedad del suelo por debajo del nivel de agotamiento permisible ocurre luego de 24 días después de la siembra. Asimismo en floración se advierte déficit hídrico, aunque la cantidad de días con contenidos de humedad por debajo del límite establecido es menor respecto a fechas de 1° de noviembre (Figura 6a). La simulación en secano obtiene un rendimiento de 10434 kg ha⁻¹.

Las estrategias de riego fueron:

- 1- aplicación de agua mediante el seguimiento teórico de la humedad del suelo;
- 2- riego deficitario.

La aplicación de riegos siguiendo la humedad del suelo (Figura 6b) logró cubrir las necesidades hídricas en el período de crecimiento, pero debido al exceso de agua aportada (riego y precipitaciones) se producen pérdidas por percolación que disminuyen la eficiencia en el uso del agua de riego. En floración, se deben aplicar riegos más abundantes a fin de evitar el déficit hídrico en ese período. De acuerdo a los resultados de la simulación se alcanza el rendimiento potencial (13000 kg ha⁻¹) dado que el aporte de agua satisface el requerimiento hídrico del cultivo de maíz en todas las etapas de crecimiento (Tabla 5).

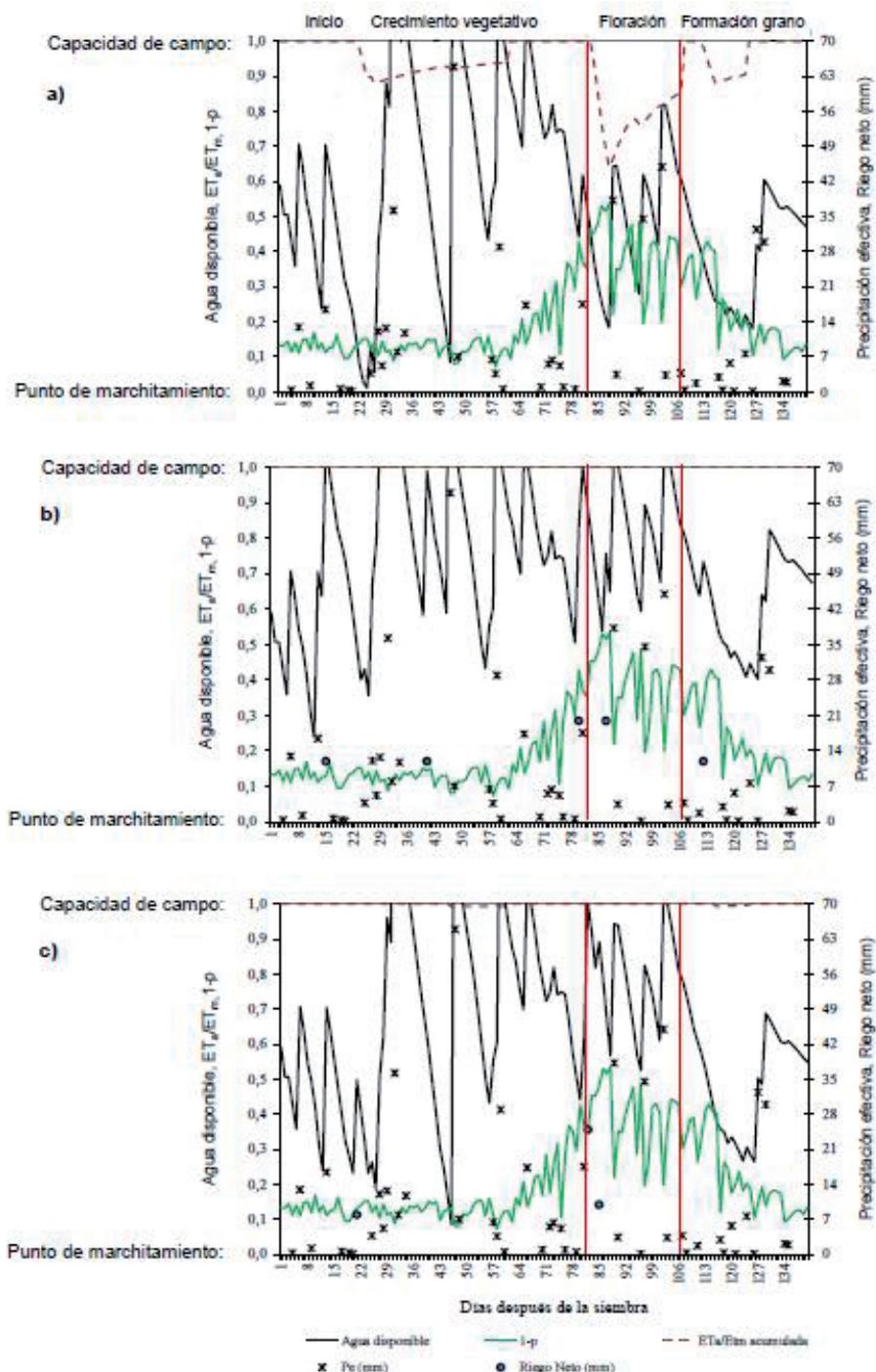


Figura 6. Comparativa entre el calendario de riegos, la evolución del contenido de humedad del suelo y los niveles de estrés por déficit hídrico: sin riego (a), seguimiento teórico de la humedad edáfica (b) y riego deficitario (c) en un cultivo de maíz sembrado el 1.º de diciembre en Villa Mercedes.

La estrategia de riego deficitario en siembras realizadas en diciembre demuestra la importancia de realizar aportes de agua en el período de floración. Este manejo permitió reducir el número de riegos, ahorrar 33 mm y favorecer la producción de grano, alcanzando rendimientos teóricos de 12959 kg ha⁻¹. En consecuencia, las relaciones entre agua aplicada y

rendimiento son mayores respecto a la estrategia 1 (Figura 6c) (Tabla 5).

Tabla 5. Rendimiento y consumo de agua con dos estrategias de riego en maíz sembrado el 1.º de diciembre.

Fecha de siembra	1º de Diciembre		
	Sin riego	Seguimiento de la humedad	Deficitario
Rendimiento (kg ha⁻¹)	10.434 (88%)	13.000 (100%)	12.959 (99%)
Riego neto (mm)	-	76	43
Número de riegos	-	5	3
Uso del agua de riego	-	171	301
Eficiencia en el uso del agua total	26	27	29

7. Recomendaciones

Los modelos de simulación de cultivos ofrecen la posibilidad de establecer diferentes estrategias de riego, evaluar sus resultados y adecuarlas en función de los recursos hídricos disponibles, determinando un avance en el uso más eficiente del agua en la agricultura. Lograr altos rendimientos en sistemas bajo riego debe ir acompañado de un estudio económico que contemple los gastos en fertilizantes y energía tendientes a conseguir el mayor margen bruto de la empresa agropecuaria.

Las estrategias aquí mencionadas para la zona de Villa Mercedes (San Luis) tienen como objetivo demostrar que el manejo de la frecuencia y el volumen de riego permiten optimizar la eficiencia en el uso del agua y maximizar la producción. Asimismo, los resultados de las simulaciones indican que es factible lograr altos rendimientos utilizando de manera racional el recurso hídrico.

Si consideramos la tendencia mundial a incrementar los costos de agua y/o energía los modelos matemáticos como MOPECO ayudarían en el futuro a elegir la mejor estrategia de riego.

8. Bibliografía

- Aguilar, M.; F. Borjas y M. Espinosa. 2007. Agronomic response of maize to limited levels of water under furrow irrigation in southern Spain. Spain. J. Agric. Res. 5: 587-592.
- Allen, R.G.; L.S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration: Guide-lines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper N.o 56. FAO, Italia.

- Andrade, F.H. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crops Res.* 41: 1-12.
- Bekele, S. y K. Tilahun. 2007. Regulated deficit irrigation scheduling of onion in a semiarid region of Ethiopia. *Agric. W. Manage.* 89: 148-152.
- Blanchet, R.; N. Gelfi y M. Bosc. 1977. Relations entre développement foliaire, transpiration et production chez la soja (cv Amsoj 71 et Hodgson). *Ann. Agron.* 29: 256-275.
- Bolaños, J. G.O. Edmeades y L. Martinetz. 1993. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical, maize. III. Responses in drought adaptive physiological and morphological traits. *Field Crops Res.* 31: 269–286.
- Cabello, M.J.; M.T. Castellanos; F. Romojaro; C. Martínez-Madrid y F. Ribas. 2009. Yield and quality of melon grow under different irrigation and nitrogen rates. *Agric. W. Manage.* 96: 866-874.
- Çakir, R. 2004. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of maize. *Field Crops Res.* 89: 1–16.
- Danuso, F.; M. Gani y R. Giovanardi. 1995. Field water balance: BidriCo 2. En: L.S. Pereira; B.J. van der Broeck; P. Kabat y R. Allen (Ed.). *Crop-Water-Simulation Models in Practice*. ICI-CIID, SC-DLO. Wageningen Pres. Wageningen, Países bajos.
- Dardanelli, J. 1994. Perspectivas del riego suplementario en la región semiárida de Córdoba. Seminario Nacional Situación Actual y Perspectivas de las Áreas Regadas en Argentina. INCYTH–Gobierno de Tucumán. INTA Tucumán. Argentina.
- de Juan, J.A.; J.M. Tarjuelo; M. Valiente y P. García. 1996. Model for optimal cropping patterns within the farm based on crop water production functions and irrigation uniformity. I: development of a decision model. *Agric. W. Manage.* 31: 115–193.
- Dogan, E.; H. Kirnak; K. Berekatoglu; L. Bilgel y A. Surucu. 2008. Water stress imposed on muskmelon (*Cucumis melo* L.) with subsurface and surface drip irrigation systems under semiarid climatic conditions. *Irrig. Sci.* 26(2): 131–138.
- Domínguez, A.; R.S. Martínez; J.A. de Juan; A. Martínez-Romero y J.M. Tarjuelo. 2012a. Simulation of maize crop behaviour under deficit irrigation using Mopeco model in a semi-arid environment. *Agric. W. Manage.* 107: 42-53.
- Domínguez, A.; J.A. de Juan; J.M. Tarjuelo; R.S. Martínez y A. Martínez-Romero. 2012b. Determination of optimal regulated deficit irrigation strategies for maize in a semi-arid environment. *Agric. W. Manage.* 110: 67-77.
- Domínguez, A.; M. Jiménez; J.M. Tarjuelo; J.A. de Juan; A. Martínez-Romero y K.N. Leite. 2012c. Simulation of onion crop behaviour under optimized regulated deficit irrigation using Mopeco model in a semi-arid environment. *Agric. W. Manage.* 113: 64-75.
- Domínguez, A.; A. Martínez-Romero; K.N. Leite; J.M. Tarjuelo; J.A. de Juan y R. López-Urrea. 2013. Combination of typical meteorological year with regulated deficit irrigation to improve the profitability of garlic growing in Central Spain. *Agric. W. Manage.* 130: 154-167.
- Domínguez, A.; J.M. Tarjuelo, J.A. de Juan; E. López-Mata; J. Breidy y F. Karam. 2011. Deficit irrigation under water stress and salinity conditions: The Mopeco-salt model. *Agric. W. Manage.* 98: 1451-1461.
- Doorenbos, J. y A.H. Kassam. 1979. Yield response to water. *Irrigation and Drainage Paper No. 33*. FAO, Italia.
- Fabeiro, C.; F. Martín de Santa Olalla y J.A. de Juan. 2002. Production of muskmelon (*Cucumis melo* L.) under controlled deficit irrigation in a semi-arid climate. *Agric. W. Manage.* 54: 93-105.
- Farré, I. 1998. Maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) response

- to deficit irrigation. Agronomy and modelling. Ph.D. Thesis. University of Lleida. 150 pp.
- Farré, I. y J.M. Faci. 2006. Comparative response of maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) to deficit irrigation in a Mediterranean environment. *Agric. W. Manage.* 83: 135-143.
- Hall, I.J.; R.R. Prairie; H.E. Anderson y E.C. Boes. 1978. Generation of Typical Meteorological Years for 26 SOL-MET stations. SAND 78-1601, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- Jordan, W.R. 1983. Whole plants response to water deficit: an overview. Pp 289-317. En: H.M. Taylor; W.R. Jordan y T.R. Sinclair, (Ed.). *Limitations of Efficient Water Use in Crop Production*. ASA, CSSA y SSSA, Madison, WI.
- Kadayifci, A.; G.I. Tuylu; Y. Ucar y B. Cakmak. 2005. Crop water use of onion (*Allium cepa* L.) in Turkey. *Agr. W. Manage.* 72: 59-68.
- Karam, F.; J. Breidy; C. Stephan y J. Roupheal. 2003. Evapotranspiration, yield and water use efficiency of drip-irrigated corn in the Bekaa Valley of Lebanon. *Agric. W. Manage.* 63: 125-137.
- Kumar, S.; M. Imtiyaz; A. Kumar y R. Singh. 2007. Response of onion (*Allium cepa* L.) to different levels of irrigation water. *Agr. W. Manage.* 89: 161-166.
- Leite, K.N.; M.J. Cabello; M. Valnir Júnior; J.M. Tarjuelo y A. Domínguez. 2014. Modelling sustainable salt-water management under deficit irrigation conditions for melon in Spain and Brazil. *J. Sci. Food Agric.* DOI: 10.1002/jsfa.6951.
- Liang, B.C.; A.F. MacKenzie; P.C. Kirby, y M. Remillard. 1991. Corn production in relation to water inputs and heat units. *Agron. J.* 83: 794-799.
- Long, R.L.; K.B. Walsh y D.J. Midmore. 2006. Irrigation scheduling to increase muskmelon fruit biomass and soluble solids concentration. *Hortscience* 41(2): 367-369.
- López-Mata, .E; J.M. Tarjuelo; J.A. de Juan; R. Ballesteros y A. Domínguez. 2010. Effect of irrigation uniformity on the profitability of crops. *Agric. W. Manage.* 98: 190-198.
- Maertens, C. y R. Blanchet. 1981. Influence des caractères hydriques du milieu recinaire er aérien sur le potential de l'eau dans les feuilles de quelques types variétaux de soja et confrontation á leur comportement agronomique. *Agronomie* 1: 199-206.
- Martín de Santa Olalla, F.J.; A. Domínguez-Padilla y R. Lopez. 2004. Production and quality of the onion crop (*Allium cepa* L.) cultivated under controlled deficit irrigation conditions in a semi-arid climate. *Agr. W. Manage.* 68: 77-89.
- Mingeau, M. 1974. Étude de la sensibilité du soja á la sécheresse. *Bull. Inf. Tech. CETIOM* 47: 1-14.
- NeSmith, D.S. y J.T. Ritchie. 1992. Effects of soil water deficits during tassel emergence on development and yield component of maize (*Zea mays*). *Field Crops Res.* 28: 251-256.
- Nieto, M.I.; J.L. Riedel y G.T. Vera. 2002. Prácticas Agrícolas de secano (Chacras) de los pequeños productores en la región de Los Llanos de la Rioja, Argentina: Características y motivos de su realización. *Revista de desarrollo rural y cooperativismo agrario*. N.º 6.
- Otegui, M.E.; F.H. Andrade y E.E. Suero. 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Res.* 40: 87-94.
- Pandey, R.K.; J.W. Maranville y A. Admou. 2000. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment. I. Grain yield and yield components. *Agric. W. Manage.* 46: 1-13.
- Pigeaire, A. 1984. Elaboration des composantes du rendement chez le soja de type indé-

- terminé (cv. Hodgson et Kingsoy). Thèse de docteur ingénieur, Inst. Nat. De Toulouse. 163 pp.
- Ramseur, E.L.; V.L. Quisenberry, S.U. Wallace y J.H. Palmer. 1984. Yield and yield components of "Braxton" soybeans as influenced by irrigation and intrarow spacing. *Agron. J.* 76: 442-446.
- Rattin, J.E.; S.G. Assuero; G.O. Sasso; J.A. Tognetti. 2011. Accelerated storage losses in onion subjected to water deficit during bulb filling. *Sci. Horti.* 130: 25-31.
- Rhoads, F.M. y J.M. Bennet. 1990. Corn. Pp 569-597. In: BA Stewart y DR Nielsen, (Ed.). *Irrigation of Agricultural Crops*. American Society of Agronomy, Madison, EE.UU.
- Salinas, A.; E. Martellotto; J.P. Giubergia; C. Alvarez; M. Bocardo; I. Severina y A.I. Arce. 2012. Resultados de 17 años de experiencia en el módulo demostrativo de riego del INTA Manfredi. En 3.a Reunión internacional de riego, Rendimientos potenciales con uso eficiente del agua e insumos, 30 y 31 de octubre del 2012.
- Shaw, R.H. 1974. A weighted moisture stress index for corn in Iowa. *Iowa State J. Res.* 49: 101-114.
- Shock, C.C.; E.G.B. Feibert, LD Saunders. 1998. Onion yield and quality affected by soil water potential as irrigation threshold. *Hortscience* 33: 1188-1191.
- Sinclair, T.R.; J.M. Bennett; R.C. Muchow. 1990. Relative sensitivity of grain yield and biomass accumulation to drought in field-grown maize. *Crop Sci.* 30: 690-693.
- Sionit, N. y P.J. Kramer. 1977. Effect of water stress during different stages of growth of soybean. *Agron. J.* 69: 274-278.
- Zuleta, J. 2013. Riego una inversión necesaria. *Ámbito financiero*. Suplemento *Ámbito del Campo*. Disponible en: <http://www.ambito.com/diario/noticia.asp?id=722116>.

El suelo cumple diversas funciones: proveer de sustento para la productividad animal y vegetal; la edificación; el ciclado de nutrientes y el agua; y el filtrado de contaminantes. Actualmente, los sistemas productivos del E de San Luis han experimentado un cambio debido al incremento en la proporción que ocupa la agricultura. Para hacer un uso sustentable del suelo, este avance debe ser acompañado por prácticas de manejo que permitan realizar un uso más eficiente del recurso sin degradarlo. Para ello, los usuarios del recurso deben conocer cuáles son los procesos y mecanismos básicos que regulan el manejo del suelo. Gestionar adecuadamente el agua en sistemas en secano implica necesariamente abordar problemáticas en la captación, el almacenaje, la conservación y la eficiencia en el uso del agua. Los sistemas en secano dependen casi exclusivamente de las precipitaciones. Las precipitaciones en regiones semiáridas son muy variables, y sus valores medios no alcanzan para cubrir las demandas de cultivos de alto rendimiento. Los sistemas de riego permiten incrementar y estabilizar los rendimientos pero requieren gestionar adecuadamente el agua, siendo eficiente en la aplicación del agua de riego. La combinación de modernos sistemas de riego con modelos de simulación permite seguir el balance hídrico de los cultivos, optimizando el uso del agua de lluvia y reduciendo la lámina de riego a aplicar, con un impacto directo sobre los costos del riego y la eficiencia de uso del agua y la energía. El objetivo de esta obra fue elaborar una guía práctica para la gestión del suelo y el agua en producciones de secano y riego de la región, enfatizando el análisis de procesos básicos y datos obtenidos a través de experiencias locales.

Claudio Alejandro Saenz
Juan Cruz Colazo
EEA San Luis

ISBN 978-987-521-633-4



Ministerio de
Agricultura, Ganadería y Pesca
Presidencia de la Nación