

# Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica



IAH 30 - Agosto 2018

## En este número

- ¿La disponibilidad de nitrógeno limita el rendimiento y calidad de la soja?
- Extracción y balance de macronutrientes en caña de azúcar
- Recomendación de fertilizantes para *Pinus* y *Eucaliptus*
- El balance de fósforo del suelo determina cambios en el nivel de fósforo extraíble
- ¿Cómo mejorar el rendimiento y margen bruto de maíz en ambientes con napa?

## IAH 30 - Agosto 2018

### Editores:

Dr. Fernando O. García - IPNI Cono Sur

Dr. Raúl Jaramillo - IPNI Norte de Latinoamérica

### Editores invitados:

Dr. Armando Tasistro

Ing. Agr. M. Sc. Adrián A. Correndo

Oficina para el Cono Sur de Latinoamérica  
Av. Maipú 1864, Cpo 1 - Piso 17 - Depto. 1  
(B1602ABR) Florida  
Buenos Aires - Argentina  
Telf/Fax.: 54 11 4791 2615  
Correo electrónico: lacs@ipni.net  
<http://Lacs.ipni.net>

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

Oficina para México y Centroamérica  
<http://mca.ipni.net>

## Contenido

### ¿La disponibilidad de nitrógeno limita el rendimiento y la calidad de la soja? 3

N. Cafaro La Menza, J.P. Monzon, M. Cánepa, y P. Grassini

### Extracción y balance de macronutrientes en caña de azúcar con riego por goteo y en secano 8

J.I. Romero, A. Sanzano, E.R. Romero, F. Madrid, Y. Navarro Di Marco, R. Miranda, H. Rojas Quinteros, G. Juárez, y R. Dellmans

### Recomendación de fertilizantes para *Pinus* y *Eucalyptus* en Corrientes, Argentina utilizando balance nutricional 14

N.I. Stahringer, J.C.L. Neves, R.B. Paulucio, J.L. Teixeira, P.A. Sussini, R.T. Argüelles, y L.L. Chamorro

### El balance de fósforo del suelo determina los cambios en el nivel de fósforo extraíble 23

F.A. Sucunza, F.H. Gutiérrez-Boem, F.O. García, M. Boxler, y G. Rubio

### ¿Cómo mejorar el rendimiento y margen bruto de maíz en ambientes con napa del sudeste de Córdoba, Argentina? 30

A. Ruiz, F. Pagnan, C. Cerliani, G. Espósito, y T. Coyos

### Cursos y Simposios 35

### Publicaciones 36

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

## Misión del IPNI

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

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



<http://www.ipni.net>

# ¿La disponibilidad de nitrógeno limita el rendimiento y la calidad de la soja?\*

Nicolás Cafaro La Menza<sup>1</sup>, Juan Pablo Monzon<sup>2</sup>, Matías Cánepa<sup>3</sup>, y Patricio Grassini<sup>1</sup>

- *En la medida que los rendimientos de soja continúen aumentando es probable que la oferta de nitrógeno (N), proveniente de la fijación biológica y de la mineralización de la materia orgánica del suelo, sea insuficiente para satisfacer la demanda de N del cultivo.*
- *Los rendimientos de grano, proteína y aceite fueron mayores en los cultivos sin limitación de N en comparación con los cultivos que dependían de la fijación biológica y de la mineralización de N del suelo. Estas diferencias se incrementaron en condiciones de alto potencial de rendimiento (> 4.5 t ha<sup>-1</sup>).*

## Introducción

El rendimiento potencial de un cultivo (Yp) está determinado por la radiación solar, la temperatura y otros factores que influyen sobre la duración de la estación de crecimiento, como pueden ser el ciclo del cultivar y la fecha de siembra. Para soja, el Yp se estima que varía entre 6 y 8 t ha<sup>-1</sup> en ambientes favorables del cinturón maicero americano y de la zona núcleo sojera de Argentina (Specht et al., 1999; Sinclair y Ruffy, 2012; Aramburu Merlos et al., 2015).

La soja necesita acumular aproximadamente 80 kg ha<sup>-1</sup> de N en su biomasa aérea para producir una tonelada de grano (Salvagiotti et al., 2008; Tamagno et al., 2017). Por lo tanto, para lograr un rendimiento de soja de 3 t ha<sup>-1</sup>, que es el promedio obtenido en los últimos 5 años en Argentina y EE.UU. ([https://www.nass.usda.gov/Quick\\_Stats/](https://www.nass.usda.gov/Quick_Stats/); <https://datos.magyp.gob.ar/>), se requieren 240 kg N ha<sup>-1</sup>, mientras que para alcanzar un Yp de 6 a 8 t ha<sup>-1</sup> son necesarios 480 a 640 kg N ha<sup>-1</sup>.

A medida que los rendimientos de soja continúan aumentando, es necesario conocer el nivel de rendimiento por encima del cual la oferta de N proveniente de la fijación biológica y de la mineralización de la materia orgánica del suelo puede llegar a ser insuficiente para satisfacer la demanda de N del cultivo. Para obtener esta información se requiere de datos de cultivos de soja que crezcan en condiciones libres de estrés.

Para cubrir los requerimientos de N de un cultivo de soja se requiere sincronizar la oferta de N del suelo y de la fijación biológica con la demanda de N del cultivo (Cassman et al., 2002). Ningún estudio previo ha intentado explícitamente cultivar soja en ambientes de muy alto potencial asegurando condiciones de N no limitante (Salvagiotti et al., 2008). En este estudio planteamos que, en ausencia de otros factores limitantes, el grado de limitación por N en soja incrementa con el aumento en el Yp del cultivo.

## Materiales y métodos

### Ensayos

Los ensayos se condujeron en Balcarce (BA), Argentina, durante dos estaciones de crecimiento (BA-Y1: 2014/2015 y BA-Y2: 2015/2016), y en cuatro localidades en el estado de Nebraska, EE.UU., durante una estación de crecimiento (2016) (Cafaro La Menza et al., 2017). Los experimentos en Balcarce consistieron en una combinación de fechas de siembra, variedades de diferente grupo de madurez, y tratamientos de N (-N y +N), mientras que los experimentos en Nebraska fueron realizados en cuatro campos de productores e incluyeron los mismos tratamientos de N (**Tabla 1**). En todos los experimentos los cultivos fueron regados, y manejados para asegurar condiciones óptimas de agua y nutrientes. En Balcarce, los ensayos fueron inoculados (Pack Nitragin Optimize II® Pack Apron® & Jumpstart); en Nebraska no se inoculó debido a la falta de respuesta a la re-inoculación en campos con historia de soja del cinturón maicero americano (de Bruin et al., 2015; Leggett et al., 2017).

### Protocolo de fertilización

Se aplicaron dos tratamientos de N: -N y +N. El objetivo del tratamiento +N fue asegurar condiciones no limitantes de N durante toda la estación de crecimiento a través de cinco aplicaciones de fertilizante nitrogenado (urea, 46-0-0) (**Figura 1**). Por el contrario, en el tratamiento -N, la soja dependió del N inorgánico a la siembra, el N mineralizado durante la estación de crecimiento y el N proveniente de la fijación biológica.

El protocolo de fertilización fue diseñado para satisfacer los requerimientos de N para el Yp calculado para cada ambiente utilizando el modelo de simulación CROPGRO-Soybean para Balcarce (Boote et al., 1998, Jones et al., 2003; Hoogenboom et al., 2010) y SoySim para Nebraska (Setiyono et al., 2010). El máximo Yp en la serie simulada (25 años) fue de 7.2 t ha<sup>-1</sup> (fecha de siembra temprana)

\* Este artículo es un resumen de Cafaro La Menza et al. 2017. *Field Crops Research* 213:204-212

<sup>1</sup> Departamento de Agronomía y Horticultura, Universidad de Nebraska-Lincoln, P.O. Box 830915, Lincoln, NE 68583-0915, EE.UU.

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Unidad Integrada Balcarce. Ruta 226 km. 73.5 Balcarce, Buenos Aires, Argentina 7620

<sup>3</sup> Asesor privado

Autor de contacto. monzon.juanpablo@inta.gob.ar

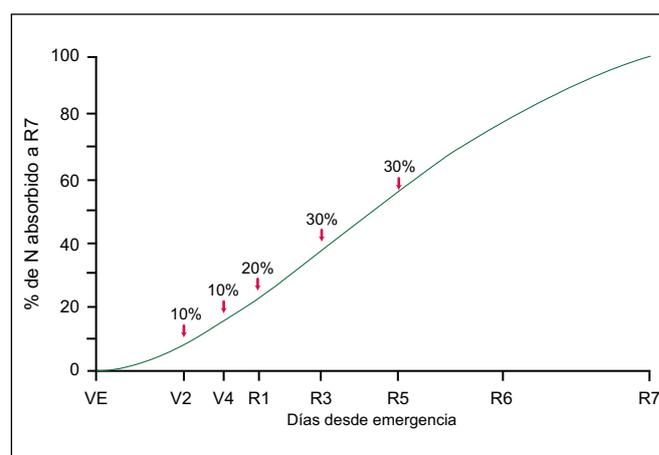
**Tabla 1. Descripción de los experimentos a campo llevados a cabo en Balcarce (Argentina) y en Nebraska, (EE.UU.).**

Experimento	Estación de crecimiento	Ubicación	Variedad y grupo de madurez (GM)	Fecha de siembra
Balcarce (BA-Y1)	2014/2015	37.7647 S	DM2200 (GM:2.1)	1 Nov, 27 Nov, 18 Dic, 6 Ene
		58.3125 W	DM3810 (GM:3.8)	
		118 m a.s.l.	DM4612 (GM:4.6)	
Balcarce (BA-Y2)	2015/2016	37.7652 S	DM2200 (GM:2.1)	3 Nov, 12 Dic, 11 Ene
		58.3117 W	DM3312 (GM:3.3),	
		118 m a.s.l.	DM3810 (GM:3.8)	
Atkinson, NE	2016	42.6372 N	AG2723 (GM:2.7)	25 Abril
		98.9561 W		
		635 m a.s.l.		
Mead, NE	2016	41.2441 N	AG2723 (GM:2.7)	8 Mayo
		96.5016 W		
		368 m a.s.l.		
Saronville, NE	2016	40.6005 N	AG2431 (GM:2.4)	26 Abril
		97.9658 W		
		538 m a.s.l.		
Smithfield, NE	2016	40.5380 N	P24T19 (GM:2.4)	13 Mayo
		99.6833 W		
		769 m a.s.l.		

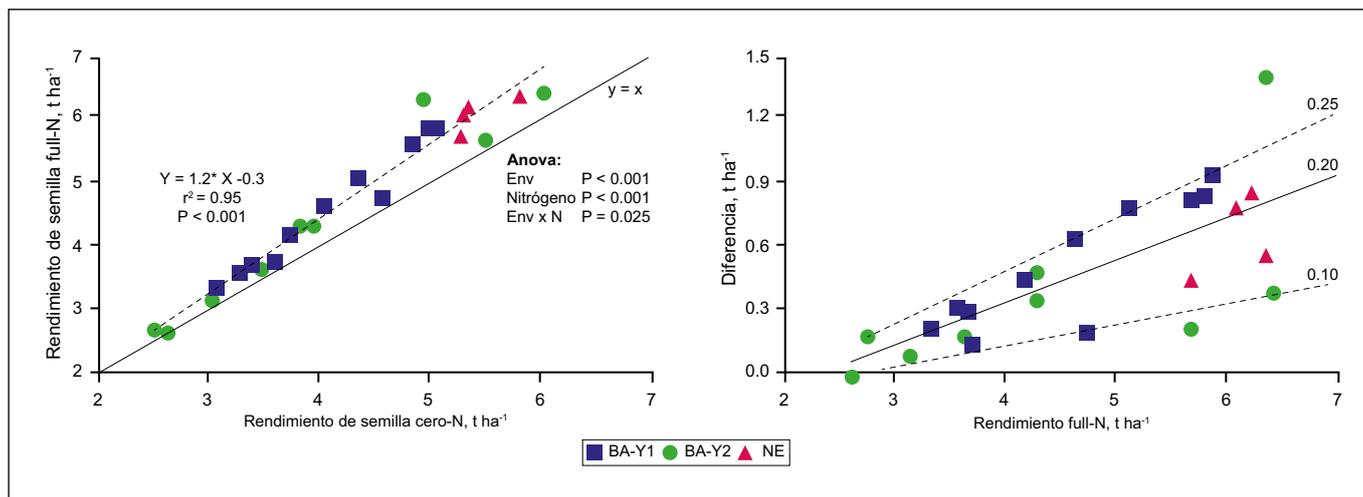
y 3.8 t ha<sup>-1</sup> (fecha de siembra tardía) en Balcarce y 7.5 t ha<sup>-1</sup> para los cuatro sitios de Nebraska. La cantidad de fertilizante aplicado se estimó en función del Yp máximo simulado para cada ambiente, y el requerimiento de 80 kg N t<sup>-1</sup> (Salvagiotti et al., 2008; Tamagno et al., 2017). No se tuvo en cuenta el aporte de N de la mineralización del suelo ni de la fijación biológica debido a la dificultad para calcular el N mineralizado y a los posibles efectos contrapuestos que se pueden generar entre la aplicación de fertilizante nitrogenado y la fijación biológica de N (Streeter, 1988). La cantidad total de fertilizante nitrogenado se incrementó en un 40% en Nebraska para compensar por las posibles pérdidas de N por volatilización o lavado debido a la posible falta de coordinación entre la aplicación de N y los eventos de precipitación o riego que permitieran incorporar el N. Por el contrario, en Balcarce se aplicó riego inmediatamente después de la aplicación de N, por lo tanto, la dosis de N solo se incrementó un 10%. Se aplicaron un total de 330 a 640 kg N ha<sup>-1</sup> a través de las fechas de siembra en Balcarce y, en promedio, 870 kg N ha<sup>-1</sup> en los campos de productores de Nebraska.

El total de N a aplicar se suministró al voleo en el entre surco en cinco momentos durante la estación de crecimiento para poder sincronizar la oferta de N con la demanda de N del cultivo (**Figura 1**). En este sentido, se usaron los patrones de absorción de N reportados por

Thies et al. (1995) y Bender et al. (2015) para asignar la cantidad total de N para cada una de las cinco aplicaciones en los estadios V2, V4, R1, R3, y R5 que fueron 10%, 10%, 20%, 30%, y 30% del total de fertilizante nitrogenado aplicado, respectivamente.



**Figura 1. Esquema que muestra el protocolo de fertilización con nitrógeno (N) seguido en los ensayos. La cantidad total de fertilizante se dividió en 5 aplicaciones (flechas rojas) en función de la dinámica temporal de absorción de N por la soja (línea negra). Las aplicaciones de N fueron de un 10% en V2 y V4, 20% en R1, y 30% (R3 y R5) de la cantidad total de N a aplicar.**



**Figura 2. Rendimiento de grano de soja para el tratamiento full-N versus cero-N. Cada punto representa un ambiente que es el resultado de año x fecha de siembra x variedad (Balcarce, BA) o campo de productor (Nebraska, EE.UU.). La línea negra indica la relación  $y = x$ . El gráfico de la derecha muestra las diferencias en rendimiento entre el tratamiento full-N y cero-N, también se muestra la regresión lineal ajustada (línea negra,  $y = 0.2x - 0.46$ ) y las pendientes representativas de las líneas límite para los percentiles 10% y 90% (líneas punteadas).**

### Mediciones

En todos los experimentos se midió la fenología del cultivo de forma semanal (escala de Fehr y Caviness, 1977). En R8 se cosecharon parcelas de 1.8 a 4.6 m<sup>2</sup> para estimar el rendimiento de grano. El rendimiento en grano se ajustó a humedad de 0.130 kg H<sub>2</sub>O kg<sup>-1</sup>. El rendimiento y la concentración de proteína y aceite se expresan en materia seca (0% humedad). Para cada tratamiento de N se midió la concentración de proteína y aceite en el grano usando un equipo FOSS InfratecTM 1241. El rendimiento de proteína o aceite (t ha<sup>-1</sup>) se calculó multiplicando el rendimiento de grano por la concentración de proteína o aceite correspondiente.

### Análisis de los datos

Se compararon gráficamente los diferentes parámetros (rendimiento de grano, proteína y aceite) para el tratamiento +N en función del tratamiento -N. Se evaluaron los desvíos de la relación 1:1 (que representa la hipótesis nula de no respuesta diferencial entre +N y -N) usando regresiones lineales y de percentiles (R Development Core Team, 2016). Para evaluar los cambios en proteína y aceite, se ajustaron regresiones lineales y cuadráticas entre el rendimiento en proteína y aceite vs el rendimiento de grano.

### Resultados

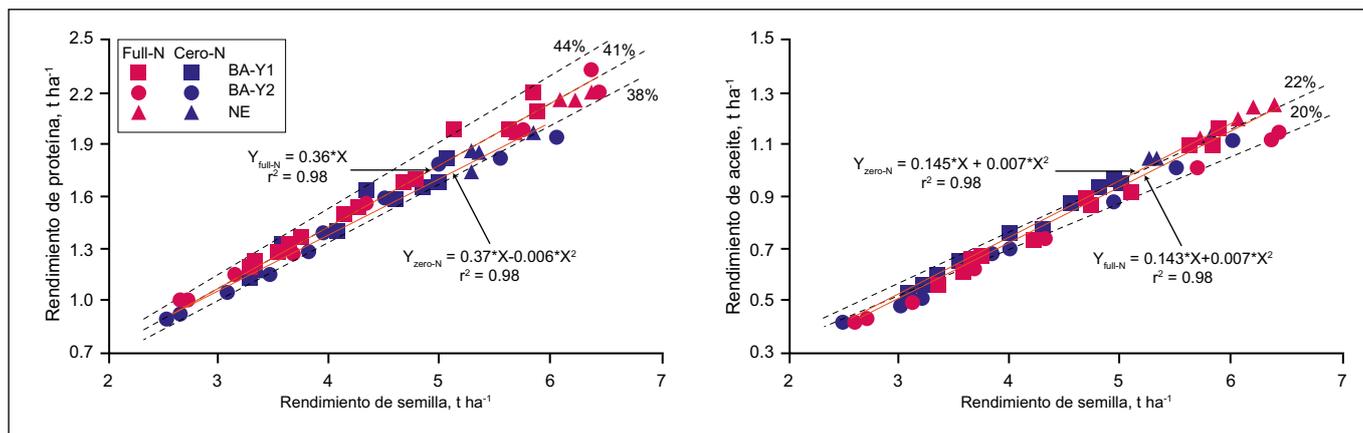
#### Rendimiento de grano en función de los tratamientos de fertilización con N

La diversidad de localidades, estaciones de crecimiento, fechas de siembra y variedades nos permitió contar con un amplio rango de rendimientos de soja, desde 2.52 a 6.46 t ha<sup>-1</sup> (Figura 2). La mitad de los datos estuvo por encima de 4.5 t ha<sup>-1</sup>, que es el umbral de rendimiento que se usa para definir ambientes de alto Yp para soja (Salvagiotti et al., 2008).

El agregado de N (+N) incrementó significativamente el rendimiento en grano (P < 0.001). En promedio a través de todos los ambientes, el rendimiento en el tratamiento +N fue de 0.46 t ha<sup>-1</sup> mayor (11%) que el tratamiento -N (Figura 2). El análisis combinado de varianzas (resumido en Figura 2) reveló una interacción significativa entre ambiente y N sobre el rendimiento (P = 0.025), que fue consistente con la separación de la regresión (pendiente = 1.2) de la línea 1:1 (P < 0.001, Figura 2). Por cada t ha<sup>-1</sup> que aumentó el rendimiento en el tratamiento -N por encima de 2.5 t ha<sup>-1</sup>, el rendimiento del tratamiento +N aumentó 1.2 t ha<sup>-1</sup>. La diferencia entre el tratamiento +N y -N aumentó con el aumento del Yp del ambiente o +N, desde cerca de cero en ambientes con bajo Yp (2-3 t ha<sup>-1</sup>) hasta 0.9 t ha<sup>-1</sup> en ambientes con un Yp de 6 t ha<sup>-1</sup> (Figura 2).

#### Proteína y aceite en soja en función de los tratamientos de nitrógeno

La relación entre el rendimiento de proteína y el rendimiento de grano fue curvilínea para el tratamiento -N, lo que sugiere un efecto de "dilución" en el contenido de proteína a medida que el rendimiento aumenta (Figura 3, izquierda). En este sentido, la concentración de proteína disminuyó (de 41% a 38%) a medida que el rendimiento del tratamiento -N fue aumentando (de 2.5 a 6 t ha<sup>-1</sup>). Sin embargo, no se observó un efecto de dilución en el tratamiento full-N donde se mantuvieron los mismos niveles de proteína a través del rango de rendimientos explorados (alrededor de 41% de proteína, Figura 3, izquierda). En otras palabras, estos patrones observados indicarían que, cuando se usó el protocolo de fertilización que asegura condiciones no limitantes de N, se aumentaron los niveles de rendimiento manteniendo los niveles de proteína. El impacto de la fertilización con N sobre el aceite en grano fue diferente, ya que la relación en ambos tratamientos fue curvilínea y positiva (Figura 3, derecha). Los rendimientos de aceite aumentaron en el tratamiento +N pero básicamente por un incremento



**Figura 3. Rendimiento en proteína (izquierda) y aceite (derecha) en función del rendimiento de grano de soja en los tratamientos +N (símbolos rojos) y -N (símbolos azules). Cada punto corresponde a un tratamiento de fecha de siembra x variedad x N (Balcarce, BA), o a un tratamiento de campo de productor x N (Nebraska, NE). Se ajustaron regresiones cuadráticas o lineales y se muestran las isolíneas de los valores de concentración de proteína y aceite para comparar.**

en el rendimiento de grano más que por un cambio en la concentración de aceite como sucedió con el contenido de proteína en el grano.

### Discusión

Los resultados de este estudio ponen en duda la hipótesis de que “la fijación biológica de N puede abastecer los requerimientos de N independientemente del Yp del ambiente de producción”. Se encontró un incremento consistente en el rendimiento de grano, proteína y aceite en el tratamiento +N vs -N, especialmente en ambientes de alto Yp, sin efectos negativos en la concentración de proteína y aceite.

Los rendimientos de proteína fueron mayores en el tratamiento +N vs -N, sugiriendo una mayor absorción de N en los cultivos +N, y la magnitud del incremento dependió del nivel de Yp del ambiente de producción. Estas dos observaciones sugieren que hay un desequilibrio entre los requerimientos de N y la oferta de N (que involucra la fijación y la mineralización de N del suelo) y que ese desequilibrio es mayor a medida que aumenta la demanda de N necesaria en ambientes de alto Yp.

Si bien las cantidades de fertilizante nitrogenado aplicadas en este estudio están lejos de ser económicamente viables y amigables con el medioambiente, el protocolo de fertilización nitrogenada utilizado nos permitió identificar un umbral de Yp por encima del cual la fijación in situ de N y la mineralización de N del suelo no fueron capaces de sostener la demanda de N del cultivo. En promedio, el rendimiento de grano del tratamiento +N aumentó, en comparación con el tratamiento -N, en 200 kg por t de aumento en el Yp, pero esta respuesta en rendimiento solo fue evidente en cultivos con un Yp por encima de 2.5 t ha<sup>-1</sup>, lo cual sugiere que la limitación por N se torna realmente importante en ambientes de alto Yp (>4.5 t ha<sup>-1</sup>). También se logró establecer un límite superior respecto a los incrementos de rendimiento esperables si se logra remover la limitación por N. El límite superior para la respuesta en rendimiento de grano fue de 250 kg por cada t de aumento

en un rango de 2.5 t ha<sup>-1</sup> a 6 t ha<sup>-1</sup>. La máxima respuesta que encontramos (≈ 0.9 t ha<sup>-1</sup> a Yp=6 t ha<sup>-1</sup>) es consistente con el rango superior de respuestas a la fertilización con N reportadas por Salvagiotti et al., (2008) y Wilson et al., (2014). Los resultados de este trabajo ponen en duda las estimaciones actuales de Yp en soja derivadas de ensayos a campo donde se asume que la fijación biológica de N provee todo el N que la mineralización no alcanza a cubrir para satisfacer la demanda del cultivo.

Finalmente, nuestros resultados sugieren que la fijación de N sola no es suficiente para sostener las altas demandas de N de cultivos de soja que crecen en ambientes de producción con altos valores de Yp, lo cual incluye cultivos localizados en el cinturón sojero de Argentina y de las planicies centrales de Estados Unidos (Grassini et al., 2015). Por lo tanto, una insuficiente oferta de N puede explicar parte de las actuales brechas de rendimiento entre los Yp simulados y los rendimientos obtenidos por productores en estos ambientes de producción. Estimamos que al menos la mitad de la actual brecha de rendimiento en esos ambientes es el resultado de la limitación de N. En un contexto más amplio, especulamos que la oferta de N será posiblemente (sí ya no lo es) el mayor factor limitante del rendimiento en los sistemas de producción de soja con altos valores de Yp (Grassini et al., 2014; Specht et al., 2014).

### Conclusiones

Encontramos que los rendimientos de soja están limitados por la oferta de N en ambientes con Yp por encima de 2.5 t ha<sup>-1</sup>. Por encima de este umbral, la respuesta al fertilizante N tiene un límite máximo de 250 kg ha<sup>-1</sup> por t de incremento en el Yp, y la respuesta sería significativa en ambientes con más de 4.5 t ha<sup>-1</sup>. Los rendimientos en proteína y aceite también fueron mayores en los tratamientos +N con respecto al -N debido a mayores rendimientos, con un pequeño aumento en la concentración de proteína. Es importante destacar que los cultivos +N mantuvieron el mismo nivel de concentración de proteína a través de todo el rango de rendimiento evaluado.

## Bibliografía

- Aramburu Merlos, F., J.P. Monzon, J.L. Mercau, M. Taboada, F.H. Andrade, A.J. Hall, E. Jobbagy, K.G. Cassman, y P. Grassini. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research* 184:145-154.
- Bender, R.R., J.W. Haegerle, y F.E. Below. 2015. Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern soybean varieties. *Agronomy Journal* 107:563-573.
- Boote, K.J., J.W. Jones, G. Hoogenboom. 1998. Simulation of crop growth: CROPGRO model. In: Peart, R.M., Curry, R.B. (Eds.), *Agricultural Systems Modeling and Simulation*. Marcel Dekker, Inc., New York, USA, pp. 651-692.
- Cafaro La Menza, N., J.P. Monzon, J.E. Specht, y P. Grassini. 2017. Is soybean yield limited by nitrogen supply? *Field Crops Research* 213:204-212.
- Cassman, K.G., A. Dobermann, y D.T. Walters. 2002. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 31:132-140.
- de Bruin, J.L., P. Pedersen, S.P. Conley, J.M. Gaska, S.E. Naeve, J.E. Kurle, R.W. Elmore, L.J. Giesler, y L.J. Abendroth. 2015. Probability of yield response to inoculants in fields with a history of soybean. *Crop Science* 50:265-272.
- Fehr, W.R., y C.E. Caviness. 1977. Stages of soybean development. Special Report 80. Iowa Agriculture and Home Economics Experiment Station, Iowa State University, Ames.
- Grassini, P., J.A. Torrión, K.G. Cassman, H.S. Yang, y J.E. Specht. 2014. Drivers of spatial and temporal variation in soybean yield and irrigation requirements in the western US Corn Belt. *Field Crops Research* 163:32-46.
- Grassini, P., J.A. Torrión, H.S. Yang, J. Rees, D. Andersen, K.G. Cassman, y J.E. Specht. 2015. Soybean yield gaps and water productivity in the western US Corn Belt. *Field Crops Research* 179:150-163.
- Hoogenboom, G., J.W. Jones, P.W. Wilkens, C.H. Porter, K.J. Boote, L.A. Hunt, et al. 2010. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5. Univ. of Hawaii, Honolulu.
- Jones, J.W., G. Hoogenboom, C.H. Porter, K.J. Boote, D.W. Batchelor, L.A. Hunt, P.W. Wilkens, U. Singh, A.J. Gijssman, y J.T. Ritchie. 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of agronomy* 18:235-265.
- Leggett, M., M. Diaz-Zorita, M. Koivunen, R. Bowman, R. Pesek, C. Stevenson, y T. Leister. 2017. Soybean Response to Inoculation with in the United States and Argentina. *Agronomy Journal* 109:1031-1038.
- R Development Core Team. 2016. R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Salvagiotti, F., K.G. Cassman, J.E. Specht, D.T. Walters, A. Weiss, y A. Dobermann. 2008. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Research* 108:1-13.
- Setiyono, T.D., K.G. Cassman, J.E. Specht, A. Dobermann, A. Weiss, H. Yang, S.P. Conley, A.P. Robinson, P. Pedersen, J.L. De Bruin. 2010. Simulation of soybean growth and yield in near-optimal growth conditions. *Field Crops Research* 119:161-174.
- Sinclair, T.R., y T.W. Ruffy. 2012. Nitrogen and water resources commonly limit crop yield increases, not necessarily plant genetics. *Global Food Security* 1:94-98.
- Specht, J.E., D.J. Hume, y S.V. Kumudini. 1999. Soybean yield potential—a genetic and physiological perspective. *Crop Science* 39:1560-1570.
- Specht, J.E., B.W. Diers, R.L. Nelson, J.F. Toledo, J.A. Torrión, y P. Grassini. 2014. Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). In: Smith JSC, Carver B, Diers BW, Specht JE (Eds.), *Yield Gains in Major US Field Crops: Contributing Factors and Future Prospects*. CSSA Special Publication #33, ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI.
- Streeter, J., y P.P. Wong. 1988. Inhibition of legume nodule formation and N<sub>2</sub> fixation by nitrate. *Critical Reviews in Plant Sciences* 71-23.
- Tamagno, S., G.R. Balboa, Y. Assefa, P. Kovács, S.N. Casteel, F. Salvagiotti, F.O. García, W.M. Stewart, e I.A. Ciampitti. 2017. Nutrient partitioning and stoichiometry in soybean: A synthesis-analysis. *Field Crops Research* 200:18-27.
- Thies, J.E., P.W. Singleton, y B.B. Bohlool. 1995. Phenology, growth, and yield of field-grown soybean and bush bean as a function of varying modes of N nutrition. *Soil Biology and Biochemistry* 27:575-583.
- Wilson, E.W., S.C. Rowntree, J.J. Suhre, N.H. Weidenbenner, S.P. Conley, V.M. Davis, B.W. Diers, P.D. Esker, S.L. Naeve, J.E. Specht, y S.N. Casteel. 2014. Genetic gain \*management interactions in soybean: II. Nitrogen utilization. *Crop Science* 54(1):340-348.✳

# Extracción y balance de macronutrientes en caña de azúcar con riego por goteo y en seco\*

Juan I. Romero, Agustín Sanzano, Eduardo R. Romero, Fabián Madrid, Yesica Navarro Di Marco, Roberto Miranda, Hugo Rojas Quinteros, Gabriela Juárez, y Raquel Dellmans

- *El balance de nutrientes de los suelos bajo actividad sucro-alcoholera en condiciones de seco y con riego por goteo es un dato importante para evaluar la sustentabilidad de los sistemas cañeros en Tucumán.*
- *Los balances de nutrientes estimados para un ciclo completo de 5 años fueron negativos para ambas situaciones hídricas.*
- *Los balances para N, P, K, Ca y Mg resultaron en -98, -25.5, -1286, -70 y -67 kg ha<sup>-1</sup>, para riego por goteo y -16, -14.5, -967, -51 y -48.05 kg ha<sup>-1</sup> para seco, respectivamente.*

## Introducción

La caña de azúcar es el cultivo sacarífero más importante del mundo. Se cultiva en áreas tropicales y subtropicales, por lo cual su producción en Argentina se concentra en tres zonas: Tucumán, el Norte (Salta y Jujuy) y el Litoral (Santa Fe y Misiones). Tucumán produce 60-65% del total nacional de azúcar, el Norte 35% y el Litoral 1%. En el área cañera de Tucumán se cultivan 274 180 ha (Soria et al., 2017) con una superficie potencial de 300 000 ha. Esta actividad sucro-alcoholera tiene un alto impacto económico, social y ambiental en el noroeste argentino. Su importancia en la región podría incluso incrementarse en los próximos años con el desarrollo energético sustentado en el aprovechamiento integral del cultivo para la producción de alimentos, biocombustibles, bioenergía eléctrica y variados bioproductos.

El uso agrícola continuado de la tierra sin una estrategia de fertilización de reposición de los nutrientes extraídos conlleva al empobrecimiento y desbalance nutricional de los suelos y a la paulatina pérdida de su capacidad productiva. Un primer paso en la búsqueda de estrategias para al menos limitar esta realidad es cuantificar el balance de nutrientes del suelo. Dicho balance se estima como la diferencia entre la cantidad de nutrientes que entran y salen de un sistema definido en el espacio y en el tiempo. En general, estos balances se consideran para la capa de suelo explorada por las raíces en periodos anuales. Los egresos de nutrientes pueden ser estimados a partir de las concentraciones promedio de los mismos en los órganos cosechados o extraídos del sistema (García, 2003). A nivel local, sin embargo, prácticamente no existen datos sobre el requerimiento y la extracción de nutrientes por la caña de azúcar.

Por otro lado, en los últimos años se produjo la adopción de la tecnología de riego por goteo en algunas explotaciones cañeras (aproximadamente 3500-4000 ha). Las mayores biomásas producidas con el aporte de esta tecnología (Romero et al., 2003; Sosa et al., 2015) implican mayores requerimientos y extracciones de nutrientes, lo que podría

acelerar la degradación o empobrecimiento de los suelos. Con el objetivo de hacer un aporte de información básica inexistente a nivel local que permita avanzar hacia un manejo más sustentable de suelos en la producción de caña de azúcar local, en la campaña 2013-2014 se inició un experimento para caracterizar la dinámica de absorción, partición y la extracción de macronutrientes de la variedad LCP 85-384 en condición de seco y bajo riego por goteo en la edad de soca. En este trabajo en particular, se publican datos de extracción de nutrientes obtenidos y se calculan balances aparentes de nutrientes para cañaverales con riego por goteo y en condición de seco.

## Materiales y métodos

El ensayo estuvo ubicado en el campo experimental de Overo Pozo de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), Departamento Cruz Alta, provincia de Tucumán (Argentina) en un lote de la variedad LCP85-384 (cultivar que ocupa alrededor del 80% del área cañera tucumana) plantada en surcos anchos distanciados a 1.8 m (55.5 surcos ha<sup>-1</sup>). Se evaluaron dos tratamientos (riego por goteo vs seco) con 5 repeticiones en un diseño totalmente aleatorizado en franjas. Durante el ciclo de caña planta, todas las parcelas fueron regadas por goteo para asegurar un óptimo establecimiento y recién luego del primer corte se establecieron los tratamientos (riego y seco). Cada unidad experimental constó de 6 surcos de 46 m de largo dentro de los cuales se marcó una subparcela de cuatro surcos de 10 m de largo para la evaluación de la población de tallos y para la realización del muestreo destructivo a la cosecha destinado a determinar la producción anual, la biomasa aérea y su partición, así como la concentración de nutrientes en los diferentes órganos.

El rendimiento cultural (toneladas de tallo molible ha<sup>-1</sup>) fue determinado en la caña planta y las 4 socas siguientes. La estimación del rendimiento cultural se realizó a partir del N° de tallos molibles por metro lineal de surco (media de tres conteos de 10 m por réplica) y del peso fresco medio de los tallos a cosecha. Éste se obtuvo de una muestra de 20

\* Versión adaptada del trabajo homónimo originalmente publicado en el XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Tucumán Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. Tucumán. Argentina  
Autor de contacto. Correo electrónico: jiromero@eeaoc.org.ar

tallos consecutivos completos por réplica, la cual se separó en hojas verdes, hojas secas, tallo molible y despunte cuyos pesos frescos se determinaron separadamente. Una submuestra de cada fracción fue secada en estufa (65 °C) para la determinación de materia seca (MS) y del contenido de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en el Laboratorio de Suelos, y de calcio (Ca) y magnesio (Mg) en el Laboratorio de Química, ambos de la EEAOC.

El N se extrajo por digestión sulfúrica, y se determinó por digestión-distilación (Kjeldahl). Los demás nutrientes se extrajeron por calcinación y se determinaron los contenidos de P por colorimetría en cenizas totales, de K por fotometría en cenizas totales, y de Ca y Mg por espectrofotometría de absorción atómica.

El sitio del ensayo presenta un suelo Haplustol típico de textura franca y franco limosa en las profundidades de 0-30 y 30-60 cm, respectivamente. El contenido de materia orgánica en los 0-30 cm es inferior al 2%. El pH del suelo es neutro, no es salino ni presenta contenido de carbonatos que puedan afectar el cultivo.

Debido a que el contenido de P extractable se encontraba dentro del rango de respuesta probable a la fertilización (21.6 ppm - Bray Kurtz II), se fertilizó todo el ensayo con superfosfato triple (0-46-0) aplicando 42 kg de P ha<sup>-1</sup> para todo el ciclo productivo del cañaveral (normalmente 5 años), según la tabla de recomendación vigente (Alonso, et al. 2015).

La caña planta fue regada y no se fertilizó con N considerando la falta de respuesta característica de esa edad del cañaveral. Su rendimiento cultural fue 71.3 t ha<sup>-1</sup>. Las 4 socas siguientes se fertilizaron con una dosis de 90 kg N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, tanto las parcelas regadas (fertirriego) como en seco. En las parcelas fertirrigadas, la dosis de N se dividió en 3 momentos de aplicación dentro del periodo recomendado (octubre-noviembre). En las parcelas en seco se hizo una sola aplicación.

Para el cálculo del balance de nutrientes de las 3 socas, se consideró como ingreso de nutrientes las fertilizaciones fosfatadas y nitrogenadas en las dosis y oportunidades descritas previamente, y como salidas la cantidad de

nutrientes contenida en los tallos cosechados (extracción) cada año. La cantidad de nutrientes absorbidos por la planta se cuantificó sumando el producto de la materia seca por el tenor de nutrientes de cada fracción de la biomasa aérea. Los valores de extracción de N, P, K, Ca y Mg presentados en este trabajo corresponden al promedio de las determinaciones efectuadas en las socas 1, 2 y 3. El resto del material vegetal aéreo permaneció en el campo luego de la cosecha (cosecha en verde), contribuyendo al reciclaje de nutrientes al sistema y por lo tanto no se los considera en el cálculo del balance.

El análisis estadístico de los datos se realizó mediante un ANOVA, utilizando el contraste de medias de Fisher LSD (p < 0.05) en el programa Infostat (Di Rienzo et al., 2016).

## Resultados y discusión

### Rendimientos

El rendimiento de la caña planta fue 71.3 t ha<sup>-1</sup> (19.6 t MS ha<sup>-1</sup>) y la producción media de las 4 socas fue 112.3 t ha<sup>-1</sup> (30.9 t MS ha<sup>-1</sup>) y 83.3 t ha<sup>-1</sup> (22.9 t MS ha<sup>-1</sup>) para riego y seco, respectivamente. El riego por goteo produjo un incremento medio de 29 t ha año<sup>-1</sup> (8 t de MS ha<sup>-1</sup>) en el rendimiento cultural (35% de incremento promedio). La producción acumulada en el ciclo económico del cañaveral (c. planta y 4 socas) fue de 520.5 t ha<sup>-1</sup> y 404.5 t ha<sup>-1</sup> para riego y seco, respectivamente.

### Extracción de nutrientes

Los datos medios de extracción de nutrientes por hectárea y por tonelada producida se encuentran resumidos en la **Tabla 1**.

Según las cantidades extraídas, tanto para riego como seco, podemos ordenar los nutrientes de la siguiente manera: K>N>Ca>P>Mg. La extracción por tonelada de caña no mostró diferencias significativas entre los tratamientos para ningún nutriente.

Los valores medios de extracción de N, P y K resultaron similares a los determinados por Leite et al. (2016) en 3 sitios del estado de San Pablo en Brasil, con 3 variedades diferentes en la edad de soca 1, que resultaron de 90,

**Tabla 1. Extracción media de nutrientes de la variedad LCP 85-384 en condición de riego por goteo y de seco en Finca Overo Pozo, Tucumán. A) kg de nutriente extraído por hectárea. B) kg de nutriente extraído por tonelada de tallos (materia seca). Valores promedio de determinaciones en tallos molibles de las socas 1, 2 y 3.**

Promedio socas 1, 2 y 3		Extracción de nutrientes, kg ha <sup>-1</sup>				
		N	P	K	Ca	Mg
A	Riego	100.4 a	15.1 a	282.6 a	18.6 a	14.4 a
	Secano	79.0 b	11.5 b	202.1 b	13.3 b	10.3 b
Promedio socas 1, 2 y 3		Extracción de nutrientes en base seca, kg t <sup>-1</sup>				
		N	P	K	Ca	Mg
B	Riego	3.25 a	0.49 a	9.14 a	0.6 a	0.47 a
	Secano	3.45 a	0.50 a	8.82 a	0.58 a	0.45 a

**Tabla 2. Balance de nutrientes en caña de azúcar con riego por goteo y en secano para el periodo soca 1-3, var. LCP 85-384 en Finca Overo Pozo, Tucumán.**

Promedio socas 1, 2 y 3	----- kg ha <sup>-1</sup> -----				
	N	P	K	Ca	Mg
Riego					
Entradas	270	42.17	0	13.6	0
Salidas	301	45	848	56	43
<b>Balance kg ha<sup>-1</sup></b>	<b>-31 a</b>	<b>-3 a</b>	<b>-848 a</b>	<b>-42.4 a</b>	<b>-43 a</b>
Secano					
Entradas	270	42.17	0	13.6	0
Salidas	237	35	606	40	31
<b>Balance kg ha<sup>-1</sup></b>	<b>+33 b</b>	<b>+8 b</b>	<b>-606 b</b>	<b>-26.4 b</b>	<b>-31 b</b>

19 y 266 kg ha<sup>-1</sup> para N, P y K, respectivamente. Por otro lado, Almeida de Oliveira et al. (2011) trabajando con 11 variedades diferentes, encontraron valores de extracción medios de N, P y K también similares a los de este trabajo.

### Balance de nutrientes

El balance de nutrientes para ambos tratamientos hídricos, considerando las 3 edades de caña soca evaluadas se presenta en la **Tabla 2**. Los balances aparentes de nutrientes de los tratamientos de riego por goteo son negativos para todos los nutrientes analizados, mientras que en las parcelas a secano los balances de N y P (aportados en parte como fertilizantes) son positivos al cabo de las tres campañas.

Un balance positivo implica que agregamos más nutriente que el exportado en la cosecha, lo que podría implicar un aumento en la reserva de dicho nutriente en el suelo. Sin embargo, debemos recordar que en el caso de un nutriente móvil en el suelo y de muy escaso efecto residual como el N, el agregado en exceso suele traducirse en mayores pérdidas por lixiviación, desnitrificación o volatilización, perdiéndose del sistema. En el caso del secano, si consideráramos una alta eficiencia de uso del N del fertilizante, esos +33 kg N ha<sup>-1</sup> del mismo que no fueron exportados en el tallo, podrían encontrarse en otros órganos del cultivo y permanecer en el residuo agronómico de cosecha, adquiriendo cierta residualidad. Sin embargo, la caña de azúcar en general presenta una baja eficiencia de uso del N del fertilizante. Vallis et al. (1996) determinó que la urea proveyó solo el 20-40% del N absorbido por la caña en una campaña, por lo que se presume que la mitad o más del N absorbido por la caña de azúcar es provista por la mineralización de la materia orgánica del suelo (Vallis y Keating, 1996). Esto significa que una buena parte del fertilizante no es absorbida por el cultivo por diferentes motivos y esa fracción del N agregado no absorbida por el cultivo puede perderse del sistema aún cuando el balance de N fuese negativo. Sin embargo, el N del fertilizante juega un rol clave en los estadios fenológicos iniciales del cañaveral, constituyendo del 40-70% del N total acumulado previo al periodo de gran crecimiento en la biomasa aérea de

la caña de azúcar. Luego, su concentración se diluye y a cosecha representa del 10 al 35% del N contenido en la parte aérea del cultivo (Franco et al., 2010). Si bien el fertirriego (riego por goteo) permitiría un mayor aprovechamiento del fertilizante, también incrementa la biomasa, el requerimiento y la extracción de N, con lo cual el aporte de N del suelo seguiría cubriendo al menos el 50% de lo absorbido por el cultivo.

Otro aporte de N para el cultivo es el proveniente de la mineralización de los residuos de cosecha (RAC). Chapman et al. (1992) encontraron que el 5% del N en el RAC marcado con <sup>15</sup>N fue asimilado con la caña de azúcar y Ng Kee Kwong (1987) determinó absorciones del 11-14% del N contenido en el RAC luego de permanecer 18 meses en condiciones de campo. Esta cantidad representaba menos del 10% del total absorbido por la planta.

El aporte del fertilizante debería ser solamente el necesario para abastecer al cultivo durante los primeros meses de crecimiento (primavera seca) cuando todavía el aporte del suelo es deficitario. Dosificaciones superiores podrían derivar en pérdidas significativas de N por lixiviación o por volatilización y una menor eficiencia agronómica de la fertilización. Los balances de N como el aquí calculado, presentan serias limitaciones como herramienta para la toma de decisiones en el manejo de la fertilización ya que no tienen en cuenta el escaso aprovechamiento del fertilizante por el cultivo y la baja residualidad en el suelo del producto no absorbido. Deben realizarse esfuerzos tendientes a incrementar la eficiencia en el uso del N del fertilizante en estas primeras etapas del cultivo y así disminuir las pérdidas al ambiente y las dosis requeridas.

En el caso del P, nutriente poco móvil y residual en el suelo, un balance positivo significa un enriquecimiento o reconstrucción progresiva de la reserva del suelo. Sin embargo, recordemos que la dosis que se agregó de superfosfato triple, de acuerdo a las recomendaciones en vigencia, debería ser suficiente para 5 cosechas y puede observarse que en 3 años sucesivos ya el balance es prácticamente neutro.

Los balances de K, Ca y Mg son negativos ya que no se agregan mediante fertilización al no ser nutrientes usualmente limitantes de los rendimientos de la caña en Tucumán. Las entradas de Ca registradas se deben a que el superfosfato triple, utilizado como fuente de P, contiene 14% de Ca. El balance de K es el más negativo en ambos tratamientos y es el nutriente normalmente absorbido en mayores cantidades por la caña de azúcar. Extracciones de K citadas en la bibliografía varían entre 53 y 343 kg K ha<sup>-1</sup> (Miles, 2012). La predominancia de la arcilla illita, rica en K, en los suelos de Tucumán hace que la fertilización potásica no sea una práctica habitual debido a los altos niveles de disponibilidad del nutriente. Sin embargo, en algunos suelos con texturas gruesas de la zona pedemontana, los contenidos de K intercambiables pueden resultar críticos (Romero et al., 2009). En estos casos, repetidos balances negativos de K, luego de décadas de producción de caña de azúcar sin fertilización, podrían causar en algún momento una disminución progresiva de la capacidad productiva de dichos lotes.

A modo de ejercicio se propuso estimar el balance de nutrientes para un ciclo completo de un cañaveral (5 años), considerando como ingreso de nutrientes la fertilización fosfatada y las 4 fertilizaciones nitrogenadas (misma dosis), considerando que no se fertilizó la caña planta. Las salidas de nutrientes del sistema, como extracción acumulada en los 5 años, se estimaron para cada tratamiento a partir de la extracción media de cada nutriente por tonelada de caña cosechada (Tabla 1). Los resultados de dicho ejercicio se muestran en la Tabla 3.

Como puede observarse los balances estimados son negativos para todos los nutrientes evaluados y en ambos tratamientos hídricos, aunque cuando se usó el riego por goteo los niveles resultaron más negativos con salidas de nutrientes mayores en 6, 1.7, 1.3, 1.3 y 1.4 veces que el secano para N, P, K, Ca y Mg, respectivamente.

De acuerdo a este balance, las parcelas con riego perdieron 6 veces más N en el ciclo que los secanos. En el caso del N en secano, el balance resulta ligeramente negativo al computarse 5 cosechas, pero solo 4 fertilizaciones (no se fertiliza la caña planta). Si se considerara una fertilización

con media dosis para la caña planta, el balance aparente sería neutro a positivo. Sin embargo, es muy importante recordar las consideraciones hechas previamente para este nutriente y su balance así calculado.

El balance de P para los 5 años, resultó negativo en ambos manejos hídricos. Aunque más evidente en el regado, la fertilización inicial de base resultó insuficiente para mantener un balance neutro luego de 5 cosechas. La dosis de P aplicada es la establecida por la tabla de recomendación vigente para ese nivel de P disponible en el suelo (21.6 ppm - Bray Kurtz II). Dichas dosis fueron establecidas siguiendo el criterio de suficiencia, razón por la cual su objetivo es mantener los niveles productivos y no mantener los niveles de P en los suelos. Si en este caso quisiéramos mantener los niveles de P en el suelo (criterio de reposición), la dosis de fertilizante debiera ser aproximadamente de 25 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> • año para el tratamiento en secano y de 30 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> • año para el regado, en lugar de los 20 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> • año recomendados.

Además, es importante remarcar que estos datos de extracción y los balances calculados provienen de cañaverales donde se practica la cosecha en verde, permaneciendo sobre el suelo todo el residuo agronómico de cosecha o RAC (hojas y fracción de tallos inmaduros). El RAC, que para las condiciones de Tucumán ha sido estimada entre 7 t y 16 t de materia seca ha<sup>-1</sup> (Romero E.R. et al., 2009), puede quedar esparcido sobre el campo como cobertura, ser incorporado en los primeros centímetros del perfil o retirarse total o parcialmente utilizando, por ejemplo, máquinas enfardadoras. Mantener los residuos de la cosecha sobre el suelo produce efectos benéficos como los siguientes: aumenta el contenido de materia orgánica y la estabilidad estructural del suelo, favorece la conservación de la humedad edáfica, reduce la erosión, disminuye la temperatura del suelo en los primeros centímetros de profundidad, aumenta la población de microorganismos benéficos, disminuye la infestación de malezas, permite reducir las labores culturales y permite el reciclado de una considerable cantidad de nutrientes (Medina, et al., 2016).

**Tabla 3. Balance aparente de nutrientes estimado para un ciclo económico (caña planta y 4 socas) de un cañaveral de LCP 85-384 con riego por goteo y en secano en Finca Overo Pozo, Tucumán.**

Caña planta - 4 socas	----- kg ha <sup>-1</sup> -----				
Riego	N	P	K	Ca	Mg
Entradas	360	42	0	14	0
Salidas	456	67	1286	83	67
<b>Balance aparente kg ha<sup>-1</sup></b>	<b>-98</b>	<b>-25</b>	<b>-1286</b>	<b>-69</b>	<b>-67</b>
Secano	N	P	K	Ca	Mg
Entradas	360	42	0	14	0
Salidas	376	57	967	65	49
<b>Balance aparente kg ha<sup>-1</sup></b>	<b>-16</b>	<b>-15</b>	<b>-967</b>	<b>-51</b>	<b>-498.5</b>

**Tabla 4. Balance de nutrientes estimado para un ciclo económico (caña planta y 4 socas) de un cañaveral de LCP 85-384 con riego por goteo y en seco con eliminación o extracción total del RAC, en Finca Overo Pozo, Tucumán.**

Caña planta - 4 socas	kg ha <sup>-1</sup>				
Riego	N	P	K	Ca	Mg
Entradas	360	42.17	0	13.60	0
Salidas	456 + <b>421</b>	67.7 + <b>33.6</b>	1285.6 + <b>682</b>	83.3 + <b>200</b>	67.6 + <b>63</b>
<b>Balance kg ha<sup>-1</sup></b>	<b>-517</b>	<b>-59</b>	<b>-1968</b>	<b>-270</b>	<b>-131</b>
Secano	N	P	K	Ca	Mg
Entradas	360	42.17	0	13.60	0
Salidas	376.2 + <b>347</b>	56.6 + <b>28</b>	966.7 + <b>513</b>	64.7 + <b>155</b>	48.5 + <b>45</b>
<b>Balance kg ha<sup>-1</sup></b>	<b>-361</b>	<b>-42</b>	<b>-1480</b>	<b>-206</b>	<b>-94</b>

Información derivada de este mismo estudio, señala que el RAC de la var. LCP 85-384 representó 15.2 t ha<sup>-1</sup> y 12.8 t ha<sup>-1</sup> de materia seca para riego por goteo y seco, respectivamente, y que en el mismo se encontraba el 48%, 33%; 35%, 72% y 50% del total del N, P, K, Ca y Mg cuantificados en la biomasa aérea (Romero et al., 2018).

Por lo tanto, de efectuar la quema del cañaveral previo a la cosecha, o la de los rastrojos luego de ésta (prácticas usadas frecuentemente hasta no hace mucho tiempo) o la extracción total o parcial del RAC con fines de aprovechamiento energético, implicaría que las salidas de nutrientes del sistema serían significativamente mayores a las consideradas en este trabajo, generando balances mucho más negativos a los aquí estimados (**Tabla 4**), a lo que debería agregarse la pérdida de C orgánico y el no aprovechamiento de todas las ventajas agronómicas que brinda la cobertura del suelo.

Una agricultura sustentable debería considerar el balance de nutrientes de los lotes. En situaciones de alta disponibilidad de nutrientes en los suelos, estos balances podrán ser negativos por determinado tiempo, pero debe monitorearse periódicamente la disponibilidad en los suelos y analizar cómo impactan. En la medida en que nos acercamos a niveles de disponibilidad críticos para los cultivos, los balances deberán ser neutros o positivos (Ciampitti et al., 2008). Los nutrientes aplicados que no son absorbidos por el cultivo en una campaña (balance positivo), no son necesariamente perdidos del sistema, sino que podrán ser utilizados por los cultivos en la campaña siguiente (residualidad). Esto ocurre especialmente con el P y el K, pero en algunas situaciones también se han observado efectos residuales de N, inmovilizado en la materia orgánica y posteriormente liberado con el transcurso del tiempo. Los balances positivos de nutrientes con residualidad permitirán recuperarlos en situaciones de baja disponibilidad. La residualidad de los nutrientes depende fuertemente de la dinámica que tienen en el sistema suelo-planta y de las condiciones edafoclimáticas, por lo que estos factores deben ser evaluados cuidadosamente al considerar posibles efectos residuales de las aplicaciones de fertilizantes (García et al., 2013).

## Conclusiones

- La extracción de nutrientes de la variedad LCP 85-384 con riego por goteo y en seco fue de 100, 15, 283, 19 y 14 kg ha<sup>-1</sup> y de 79, 11, 202, 13, y 10 kg ha<sup>-1</sup> de N, P, K, Ca y Mg, respectivamente.
- Los balances de nutrientes estimados para un ciclo completo de 5 años fueron negativos tanto con riego por goteo o en seco, pero la magnitud de las pérdidas fue marcadamente superior en el tratamiento con riego por goteo.
- La eliminación total o parcial del RAC significaría una mayor pérdida de nutrientes del lote que debe ser considerada.
- El conocimiento de las dinámicas de absorción, los requerimientos y las extracciones de las diferentes variedades de caña de azúcar utilizadas en la región y los balances de nutrientes son un paso importante en el avance hacia una nutrición balanceada y una producción de caña más sustentable, que permita mantener o incrementar la producción con una mayor eficiencia en el uso de los recursos y manteniendo la fertilidad de los suelos.

## Bibliografía

- Almeida de Oliveira, E.C., F. Freire, R.I. de Oliveira, A. Campelo de Oliveira y M.B. Galvao dos Santos Freire. 2011. "Acúmulo e alocação de nutrientes em cana de açúcar." Revista Ciencia Agronómica, Vol. 42(3):579-588.
- Alonso, L., E.R. Romero, F. Leggio, L. Tórtora, P. Fernández González, N. Grellet, L. Vera y J. López Guzmán. 2015. En "Fertilización de la caña de azúcar". Editores: Digonzelli, P., E.R. Romero y J. Scandaliaris; Guía Técnica del Cañero. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. Tucumán, Argentina. Vol. 1:187-197.
- Champan, L.S., M.B.C. Haysom, y P.G. Saffigna. 1992. N cycling in cane fields from 15N labelled trash and residual fertiliser. Aust. Soc. Sug. Cane Technol. Vol. 14:84-89.

- Ciampitti, I., y F. García. 2008. Balance y eficiencia de uso de nutrientes en sistemas agrícolas. *Revista Horizonte A*. Año IV, Nº 18:22-28. Buenos Aires, Argentina.
- Di Rienzo J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, y C.W. Robledo. 2016. *InfoStat versión 2016*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Franco, H.C.J., P.C.O. Trivelin, R. Otto, C.E. Faroni, A.C. Vitti, y E.C.A. Oliveira. 2010. Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol.* Vol. 27.
- García, F. 2003. Balance de nutrientes en la rotación: impacto en rendimientos y calidad de suelo. Segundo Simposio de Fertilidad y Fertilización en Siembra Directa organizado por AAPRESID, Fertilizar e INPOFOS Cono Sur. Rosario, Santa Fe, Argentina. 26-29 agosto 2003.
- García, F., y M. González Sanjuan. 2013. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica IAH 9*. International Plant Nutrition Institute. [www.ipni.net](http://www.ipni.net)
- Kee Kwong, N.F., J. Deville, P.C. Cavalot, y V. Riviere. 1987. Value of cane trash in nitrogen nutrition of sugarcane. *Plant and Soil*, Vol. 102:79-83.
- Leite, J.M., I.A. Ciampitti, E. Mariano, M. Vieira-Megda, y P. Trivelin. 2016. Nutrient Partitioning and Stoichiometry in Unburnt Sugarcane Ratoon at Varying Yield Levels. *Frontiers in Plant Science*. Vol. 7. Article 466 ([www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)).
- Medina, M., J. Fernandez de Ulivarri, F.A. Sosa, P. Digonzelli, A.A. Criado, F.J. Pérez Alabarse, y L.M. Romero. 2016. Resultados preliminares sobre el efecto del residuo agrícola de cosecha en verde de la caña de azúcar (RAC) sobre los componentes del rendimiento cultural y la producción de caña bajo riego. Libro de resúmenes XX Reunión Técnica Nacional de Caña de Azúcar (SATCA). Área Agrícola, trabajo Nº 43.6-8 abril 2016, Tucumán, Argentina.
- Miles, N. 2012. Potassium requirements and soil acidity management for sugarcane. *FSSA Journal* 39-45.
- Romero, E.R., J. Scandaliaris, L. Sotomayor, y L. Alonso. 2003. Resultados de la primera experiencia de riego por goteo en caña de azúcar en Tucumán, Argentina. *Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán* 80(1-2):5-9.
- Romero, E.R., L. Alonzo, S. Casen, M.F. Leggio, J. Tonatto, J. Scandaliaris, P. Digonzelli, J. Giardina, y J. Fernandez de Ulivarri. 2009. En *Fertilización de la caña de azúcar*. Editores: Romero, E.R., P. Digonzelli, y J. Scandaliaris. Manual del Cañero. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. Tucumán, Argentina.
- Romero, J.I., A. Sanzano, y E.R. Romero. 2018. Extracción y balance de macronutrientes en caña de azúcar con riego por goteo y en secano. Libro de resúmenes del XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. San Miguel de Tucumán, mayo 2018. pp. 703-708.
- Soria, F., C. Fandos, P. Scandaliaris, y J. Carreras Baldrés. 2017. Relevamiento satelital de los principales cultivos de la provincia de Tucumán. Campaña 2015/2016. [www.eeaoc.org.ar](http://www.eeaoc.org.ar)
- Sosa, F.A., C. Hernández, M. Morandini, A. Sanzano, E.R. Romero, G. Robledo, R. Correa, J.I. Romero, C. Sotomayor, y H. Rojas Quinteros. 2015. Respuesta de la caña de azúcar a distintas dosis de nitrógeno aplicadas vía riego por goteo enterrado y en secano en Tucumán, Argentina. *Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán* 92(2):7-15.
- Vallis, I., V.R. Catchpoole, R.M. Hughes, R.J.K. Myers, D.R. Ridge, y K.L. Weier. 1996. Recovery in plants and soils of 15N applies as subsurface bands of urea to sugarcane. *Aust. J. Agric. Res.* 47(3):355-370.
- Vallis I., y B.A. Keating. 1996. Uptake and loss of fertilizer and soil nitrogen in sugarcane crops. *Sugar cane* 2:12-16. 🌻

# Recomendación de fertilizantes para *Pinus* y *Eucalyptus* en Corrientes, Argentina utilizando balance nutricional

N.I. Stahringer<sup>1\*</sup>, J.C.L. Neves<sup>1</sup>, R.B. Paulucio<sup>1</sup>, J.L. Teixeira<sup>1</sup>, P.A. Sussini<sup>2</sup>, R.T. Argüelles<sup>3</sup>, y L.L. Chamorro<sup>4</sup>

- *Alcanzar metas de productividad deseadas en bosques implantados requiere suministrarles las cantidades de nutrientes que estos demandan.*
- *La calibración de modelos de balance nutricional para especies forestales plantadas en Argentina es una alternativa promissora para recomendar fertilizantes con un fundamento más científico y menos empírico.*
- *Estos modelos permiten entender cuando es preciso fertilizar y con qué dosis según cada situación en busca de optimizar el uso de recursos y mantener la sustentabilidad de la producción forestal.*

## Introducción

En Argentina existen aproximadamente 1 300 000 ha plantadas con especies forestales de rápido crecimiento entre las que se destacan los géneros *Pinus* y *Eucalyptus* (Argentina, 2018). La provincia de Corrientes posee la mayor superficie de bosques implantados del país con aproximadamente 500 000 ha, de las cuales alrededor de 70% son *Pinus* y 30% *Eucalyptus* (Elizondo, 2015).

La superficie de bosques implantados anualmente en Corrientes ronda las 20 000 ha (Elizondo, 2009, 2015), generalmente sobre suelos de baja fertilidad (Larocca et al., 2004; Aparicio et al., 2005). A su vez, las prácticas de fertilización y enclavado no son frecuentes en estas plantaciones forestales. Goya et al. (2003) advierten que, en caso de realizarse prácticas de cosecha más extractivas de nutrientes, como la retirada de toda la parte aérea de los árboles y/o la quema de los residuos tras la cosecha, se alcanzarán niveles críticos de estabilidad para P y K en aproximadamente 2 rotaciones forestales si no se realizan aportes por fertilización. Cabe destacar que este estudio fue realizado en Misiones, en suelos rojos (*Kandiudultes*). Estos suelos son similares a los de mayor índice de producción de Corrientes (Cruzate y Panigatti, 2008), resta entonces pensar en cuál es el panorama para los demás suelos forestales que son menos fértiles.

La obtención de elevadas productividades en bosques implantados, de manera sustentable, depende de un adecuado manejo nutricional entre otros factores. Este tipo de manejo contempla la provisión de nutrientes minerales vía fertilización, cuando el suministro de nutrientes por parte del suelo no alcanza a cubrir la demanda nutricional prevista para una determinada meta de productividad forestal.

Actualmente empresas forestales de Brasil, que en conjunto suman más de 1 000 000 ha, utilizan un modelo de balance nutricional desarrollado y mejorado en el

Departamento de Suelos de la Universidad Federal de Viçosa (UFV) (Barros et al., 1995), para obtener sus recomendaciones de fertilizantes. Dicho modelo ha contribuido significativamente para aumentar la productividad promedio de eucalyptus de 15 para 40 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en los últimos 30 años.

En base a lo descrito, pensamos que, calibrar este modelo de balance nutricional para Corrientes, así como modelos ecofisiológicos y de diagnóstico nutricional, serían de gran utilidad para contribuir al desarrollo y a la sustentabilidad del sector forestal de la provincia y de la Argentina. A continuación, se describe la base teórica y la implementación del modelo de balance nutricional para plantaciones forestales en Corrientes, mayor información se puede consultar en Stahringer (2017).

## Metodología de trabajo

El trabajo se realizó en Corrientes, provincia del noreste de Argentina, que limita al norte con Paraguay y al este con Brasil y Uruguay. La mayor parte de la provincia posee una altitud inferior a 80 m.s.n.m. (variando de 20 a 220 m.s.n.m.). Se caracteriza por tener un relieve con extensas planicies en el oeste, una parte deprimida en el centro de la provincia (Esteros del Iberá) y suaves colinas en el este. Posee un clima subtropical, muy cálido en verano, pero con heladas en invierno. Presenta frecuentes excesos hídricos en otoño y primavera, y moderados y eventuales déficit, principalmente en verano, con precipitaciones variando de 1100 a 1700 mm por año (Escobar et al., 1996; Cruzate y Panigatti, 2008).

El crecimiento de las especies forestales estudiadas varía según el tipo de suelo en Corrientes (Elizondo, 2009). Fueron realizados muestreos en diferentes regiones de la provincia. En cada región se muestreo una o más especies que fuesen especies representativas de la región (**Figura 1**). Dentro de cada especie se hizo el muestreo siguiendo una cronosecuencia, siendo que, para cada especie, y

<sup>1</sup> Departamento de Suelos, Universidad Federal de Viçosa. Minas Gerais, Brasil

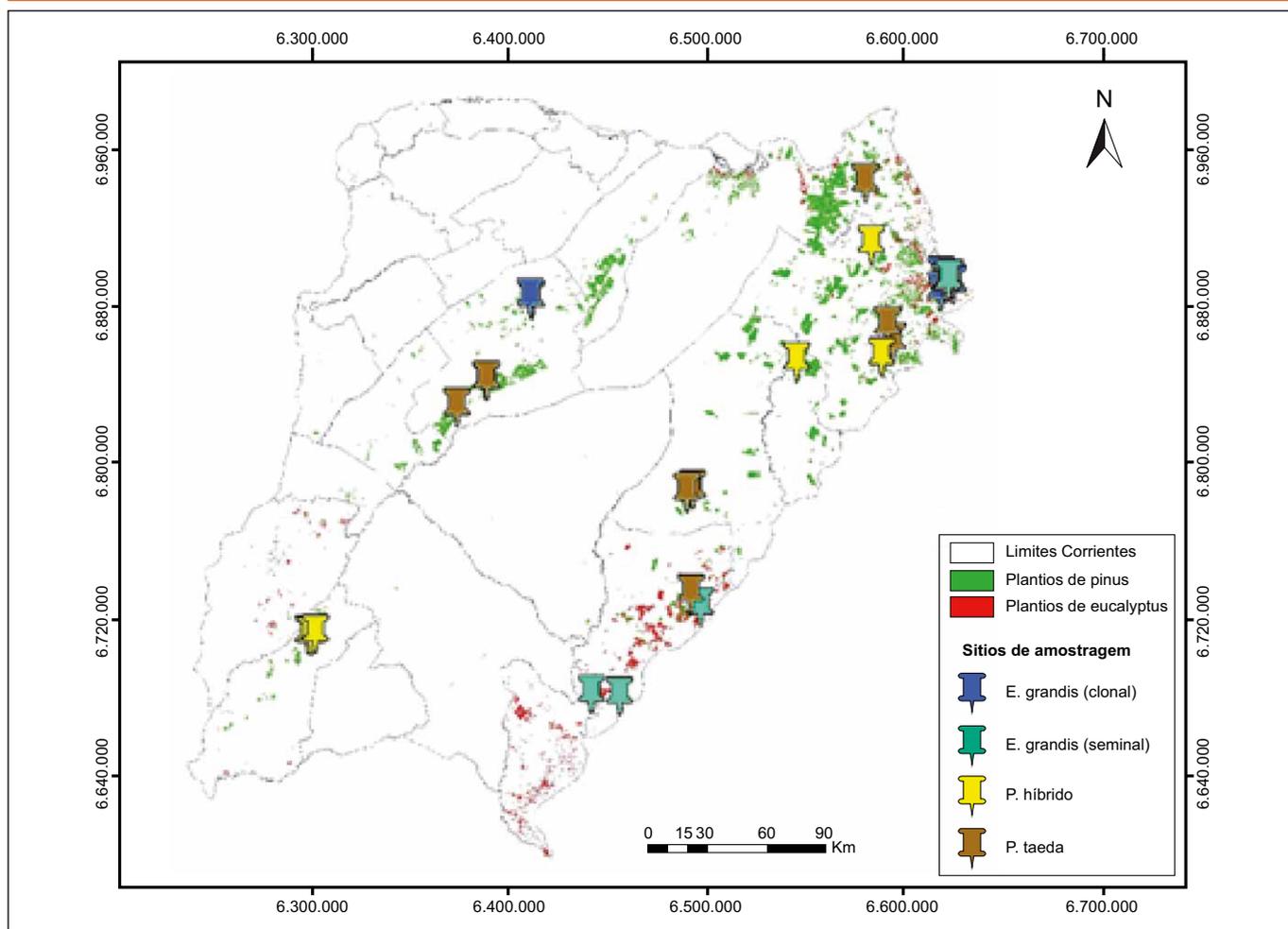
<sup>2</sup> INTA Colonia Benítez, Argentina

<sup>3</sup> Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur, Argentina

<sup>4</sup> Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Nordeste, Argentina

\* Parte del trabajo de tesis del Dr. Nicolás Ignacio Stahringer, que fue reconocido con el Premio IPNI Scholar Award 2017

Autor de contacto. Correo electrónico: nicostahringer@hotmail.com



**Figura 1. Mapa de la provincia de Corrientes con la distribución de los bosques cultivados y la ubicación de los puntos de muestreo de *P. taeda*, *P. híbrido*, *E. grandis* seminal y clonal. Fuente: Adaptado de (Elizondo, 2015).**

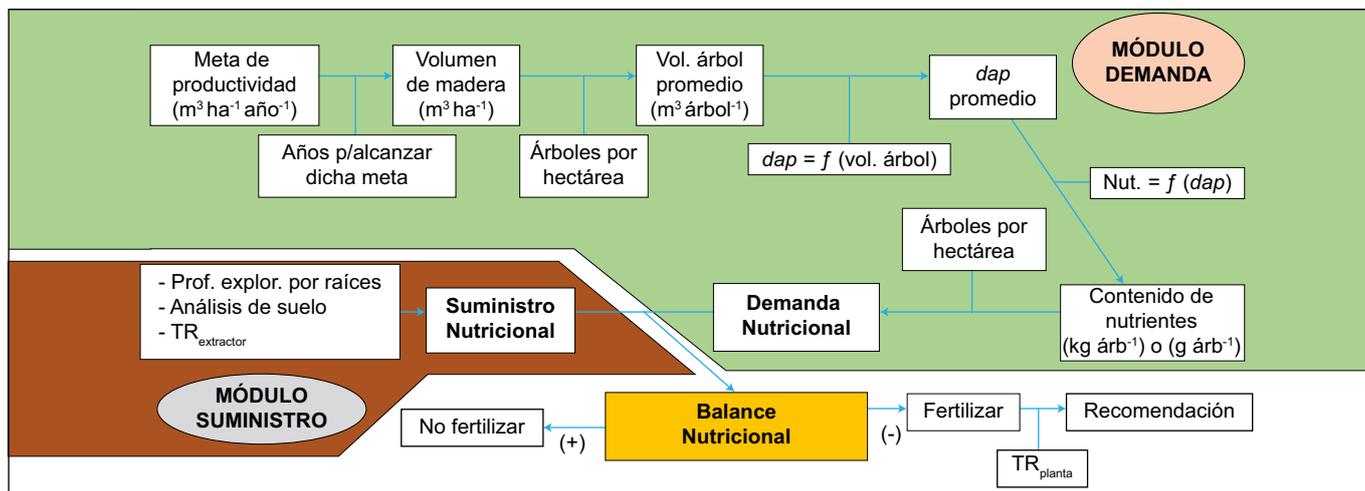
dentro de cada región, se muestrearon por lo menos tres edades y tres clases diamétricas (superior, promedio e inferior) por edad. En este trabajo fueron muestreados árboles con edades variando de 10 meses hasta 16 años.

Para efectuar los muestreos se realizó un trabajo de campo que duró 35 días ininterrumpidos, recorriendo aproximadamente 5000 km a lo largo y ancho de la provincia. Previo al mismo se hizo un levantamiento de informaciones y se coordinó la logística con las cinco empresas forestales en cuyos campos se realizaron los muestreos.

Dentro del género *Pinus* se trabajó con *P. taeda* por ser la especie más plantada en Corrientes y con el pino entre *P. elliottii* var. *elliottii* x *P. caribaea* var. *hondurensis*, porque este último se está plantando cada vez más en la provincia. En cuanto que del género *Eucalyptus* se trabajó con la especie *E. grandis*. En Corrientes se planta *E. grandis* propagado por semilla (seminal) y vegetativamente (clonal). En trabajos realizados en la UFV se ha observado que materiales seminales y clonales poseen demandas nutricionales diferentes, razón por la cual se optó por muestrear tanto *E. grandis* (seminal) cuanto *E. grandis* (clonal) por separado.

El trabajo de campo consistió en muestreos de suelos y en la cubicación y muestreo de tejidos vegetales en

31 sitios forestales distribuidos por toda la provincia. Inicialmente se hizo una preselección en gabinete de los posibles sitios a muestrear en función de las características buscadas para cada especie y región. Ya a campo, se seleccionaron los mejores rodales de los que habían sido preseleccionados anteriormente. En los rodales seleccionados se midió el *cap* (circunferencia a la altura del pecho = circunferencia a 1.30 m de altura, x) en parcelas temporarias y se identificó un árbol superior ( $\geq \bar{x} + s$ ), un árbol promedio ( $\bar{x} - s < \bar{x} < \bar{x} + s$ ) y un árbol inferior ( $\leq \bar{x} - s$ ). Una vez identificados los árboles, estos fueron apeados, se midió su altura, se retiraron discos de cada cuarto del fuste y se pesaron por separado todos los componentes (hojas, ramas y tronco) de cada árbol. A su vez, se tomaron muestras de hojas, ramas, madera, corteza y hojarasca para determinar materia seca y concentración de macronutrientes [nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S)] y micronutrientes [cobre (Cu), hierro (Fe), cinc (Zn), manganeso (Mn) y boro (B)]. En los mismos sitios, se muestreo el suelo hasta 1 m de profundidad (0-20, 20-40, 40-60 y 60-100 cm) para realizar análisis de rutina y se tomaron muestras sin disturbar para determinar la densidad aparente (0-20 y 20-40 cm). En total fueron recolectadas 1620 muestras de tejidos vegetales y 318 muestras de suelo.



**Figura 2. Diagrama de flujo del modelo de balance nutricional para cultivos forestales considerando el módulo demanda (planta) y el módulo suministro (suelo). Fuente: Adaptado de Stahringer et al. (2014).**

### Modelo de balance nutricional: Base teórica

Para llegar a recomendaciones de fertilizantes fundamentadas, que contemplen la demanda de nutrientes del cultivo y el suministro de nutrientes del suelo, utilizamos modelos basados en el balance nutricional entre estos componentes. Modelos de este tipo vienen siendo desarrollados en la UFV para diferentes cultivos (Novais et al., 2007). La lógica del modelo de balance nutricional para cultivos forestales que se utilizó en este trabajo se encuentra resumida en el diagrama de flujo de la **Figura 2**.

Para calcular la demanda nutricional del rodal se debe partir de una meta de productividad que se pretende alcanzar en un dado periodo de tiempo, expresada como incremento medio anual del tronco a una determinada edad (IMA<sub>tronco</sub>). Dicha meta puede ser establecida por el productor forestal a partir de su experiencia y de conocer el sitio forestal donde se va a establecer la plantación, o bien puede ser estimada utilizando el modelo ecofisiológico 3-PG (*Physiological Principles in Predicting Growth*). Este modelo, desarrollado por Landsberg y Waring (1997) fue parametrizado para *Pinus* y *Eucalyptus* en Corrientes (Stahringer, 2017). A partir de esta meta, y teniendo en cuenta la edad para la cual fue establecida, se calcula el volumen de madera a producir por hectárea. Al dividir ese volumen por el número de árboles en una hectárea se obtiene el volumen de un árbol promedio de la población, y, a partir de este se calcula su *dap* (diámetro a la altura del pecho = diámetro a 1.30 m de altura) utilizando una ecuación alométrica ajustada para tal fin. Una vez calculado este *dap*, se lo utiliza en ecuaciones alométricas ajustadas en este trabajo, para calcular los contenidos de cada nutriente en los componentes de un árbol promedio de la población. Para ajustar las ecuaciones alométricas se usaron datos obtenidos en la cubicación de los árboles, así como los contenidos de nutrientes determinados a partir de los valores de materia seca y concentraciones. Los contenidos de macronutrientes se expresan en kg del nutriente por componente, y los contenidos de micronutrientes se expresan en g del nutriente por componente. A continuación, para calcular

la demanda de cada nutriente en un árbol promedio, se suman los valores de los contenidos obtenidos en cada componente. Al multiplicar el contenido de cada nutriente de un árbol promedio por el número de árboles en una hectárea se obtiene la demanda de cada nutriente en kg ha<sup>-1</sup> para macronutrientes y en g ha<sup>-1</sup> para micronutrientes (**Figura 2**).

Para conocer la cantidad de nutrientes suministrados por el suelo se debe tener en cuenta la profundidad explorada por las raíces del cultivo, la concentración de cada nutriente y la tasa de recuperación por el extractante (TR<sub>ext</sub>). En este trabajo se consideraron las camadas de 0-20 y 20-40 cm ya que en las camadas superficiales (primeros 30-40 cm) se encuentran más de 70% de las raíces finas de *Pinus* y *Eucalyptus* (Nambiar, 1983; Neves, 2000), siendo que estas raíces y los pelos radiculares son los principales responsables por la absorción de nutrientes (Marschner, 1995). La concentración de cada nutriente en el suelo se obtiene a partir de análisis de rutina. Por su parte, la TR<sub>ext</sub> sirve para determinar que proporción del nutriente que se encuentra en el suelo, o que es aplicado vía fertilizante, efectivamente es recuperado por el extractante químico utilizado (**Figura 2**).

El balance nutricional consiste en hacer la diferencia entre la demanda, estimada para una determinada meta de producción, y el suministro provisto por el suelo. Si el balance arroja un valor positivo, para un dado nutriente, en principio no es necesario fertilizar con ese nutriente, pero siendo conscientes de que se está reduciendo la fertilidad del suelo (**Figura 2**). Sin embargo, pensando en la sustentabilidad del sistema productivo, es importante tener en cuenta la exportación de nutrientes con los productos cosechados para reponerlos vía fertilización. Además, para el caso particular del P, hay que destacar que independientemente de que el balance nutricional sea positivo, se recomienda una fertilización de implantación con 40 g de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por planta para eucalyptus ya que este nutriente favorece el desarrollo de raíces finas. Este estímulo del P en el arranque se debe a que el nivel crítico para la fase de implantación de eucalyptus es

**Tabla 1. Resultados de análisis de suelo previo a un segundo ciclo de eucalyptus de dos sitios forestales de Corrientes, Argentina.**

Característica	Unidad	Sitio 1		Sitio 2	
		0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm
pH <sup>1/</sup>		4.98	4.65	4.32	4.66
M.O. <sup>2/</sup>	% (dag kg <sup>-1</sup> )	1.86	1.19	1.39	0.72
P <sup>3/</sup>	ppm (mg kg <sup>-1</sup> )	2.93	1.72	1.54	0.29
K <sup>4/</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	0.09	0.06	0.04	0.02
Ca <sup>4/</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	3.27	1.22	0.21	0.25
Mg <sup>4/</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	0.78	0.46	0.43	0.22
Na <sup>4/</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	0.05	0.04	0.02	0.02
Acidez intercambiable (Al <sup>3+</sup> ) <sup>5/</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	0.11	0.69	0.8	0.71
C.I.C. efectiva (t)	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	4.3	2.47	1.5	1.22
C.I.C. total (T)	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	5.7	3.37	2.62	1.9
Saturación por bases (V)	%	73.4	52.8	26.6	26.8
Saturación por aluminio (m)	%	2.6	27.9	53.5	58.3
Arena <sup>6/</sup>	%	78.57	76.01	75.92	79.7
Limo <sup>6/</sup>	%	9.36	11.08	14.43	10.51
Arcilla <sup>6/</sup>	%	12.07	12.92	9.65	9.8
Densidad Aparente <sup>7/</sup>	g cm <sup>-3</sup>	1.59	1.64	1.56	1.59
P-rem <sup>8/</sup>	mg L <sup>-1</sup>	46.4	33.9	34.4	37.7

<sup>1/</sup> pH en agua, relación 1:2.5. <sup>2/</sup> Materia orgánica, mét.: Walkey & Black. <sup>3/</sup> P disponible, mét.: Bray-1. <sup>4/</sup> Cationes intercambiables, mét.: Acetato de amonio 1 N a pH 7. <sup>5/</sup> Mét.: KCl 1 mol L<sup>-1</sup>. <sup>6/</sup> Mét. de Bouyoucos. <sup>7/</sup> Mét.: cilindro de volumen conocido. <sup>8/</sup> P remanente = concentración de P en la solución de equilibrio, determinado luego de agitar por una hora una alícuota de suelo con CaCl<sub>2</sub> 10 mmol L<sup>-1</sup>, conteniendo 60 mg L<sup>-1</sup> de P, siendo la relación suelo:solución de 1:10 (Alvarez et al., 2000).

muy elevado, del orden de 60 a 80 mg dm<sup>-3</sup> (Mehlich-1) para suelos arcillosos y arenosos respectivamente (Novais et al., 1986), lo cual equivale a aproximadamente 60 a 65 mg kg<sup>-1</sup> (Bray-1), según cálculos realizados con base en Bahia Filho et al. (1983) y Stahringer (2017). En pino también se han registrado efectos positivos para la fertilización fosfatada al momento de la implantación con dosis de 45-55 g P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por planta (Fernandez et al., 1999; Ibañez et al., 2004).

Por otro lado, si el balance arroja un valor negativo, para un dado nutriente, es necesario fertilizar con dicho nutriente para que la meta de productividad no se vea comprometida por este elemento. La cantidad del dado nutriente que debe ser adicionada vía fertilizante equivale a la diferencia entre la demanda y el suministro del nutriente en cuestión dividido por la tasa de recuperación por la planta (TR<sub>planta</sub>). Esta última se utilizó para ajustar la dosis a ser adicionada de cada nutriente debido a que los árboles no consiguen absorber el 100% de un nutriente aplicado al suelo vía fertilizante sino una fracción del mismo. El porcentaje de cada nutriente que consiguen absorber es la TR<sub>planta</sub> (Figura 2).

### Ejemplo de utilización del modelo de balance nutricional en Corrientes

Se plantea un ejemplo de utilización del modelo de balance nutricional considerando N, P, K, Ca y Mg a modo de un estudio de caso. El escenario hipotético es un cultivo de *E. grandis* (seminal), con 1000 árboles ha<sup>-1</sup>, que sería implantado buscando un IMA<sub>tronco</sub> a los 4 años (edad del primer raleo) de 35 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Utilizando una ecuación alométrica ajustada se obtiene el *dap* de un árbol promedio de este rodal que sería de 15.6 cm. Se plantea este ejemplo para dos sitios forestales de Corrientes. Ambos sitios fueron ganaderos hasta aproximadamente 20 años atrás. Luego tuvieron un ciclo de eucalyptus y estarían entrando a un segundo ciclo de eucalyptus. Así, en un análisis de suelos hecho previo a la implantación al segundo ciclo de eucalyptus, es posible observar que los sitios se diferencian entre sí principalmente porque uno posee una mayor fertilidad que el otro (Tabla 1).

A partir de los resultados de análisis de suelo presentados en la Tabla 1, teniendo en cuenta una profundidad explorada por las raíces de 40 cm y considerando las TR<sub>ext</sub>, es posible estimar, en ambos sitios, el suministro de nutrientes por parte de los suelos (Tabla 2).

**Tabla 2. Suministro de nutrientes y TR<sub>ext</sub> en dos sitios forestales de Corrientes, Argentina.**

Nutriente	Sitio 1					Sitio 2				
	0-20 cm		20-40 cm		Total	0-20 cm		20-40 cm		Total
	TR <sub>ext</sub>	kg ha <sup>-1</sup>	TR <sub>ext</sub>	kg ha <sup>-1</sup>		TR <sub>ext</sub>	kg ha <sup>-1</sup>	TR <sub>ext</sub>	kg ha <sup>-1</sup>	
N		409		117	526		300		69	369
P	0.59	16	0.57	10	26	0.64	7	0.64	1	9
K	0.68	158	0.85	93	251	0.84	56	0.90	32	87
Ca	0.93	2245	0.93	866	3111	0.93	138	0.93	169	307
Mg	0.94	321	0.94	194	515	0.94	175	0.94	91	265

El suministro de N fue calculado con base en los contenidos de materia orgánica de cada camada y teniendo en cuenta una tasa de mineralización de N de 3.0% y 1.3% para las camadas de 0-20 y 20-40 cm, respectivamente. Para llegar al valor de N suministrado por camada se utilizó el método desarrollado por Stanford & Smith (1972) y ajustado por Gonçalves et al. (2001) para condiciones de ecosistemas forestales. Las tasas de recuperación por los extractantes de P, K, Ca y Mg fueron obtenidas a partir de un experimento conducido como para tal fin (Stahinger, 2017). La TR<sub>ext</sub> de P considera el porcentaje de arcilla, o, en caso de disponer de la información, utiliza la variable P remanente (P-rem) que tiene la virtud de contemplar porcentaje de arcilla y su mineralogía en una determinación simple (Alvarez et al., 2000). Esta determinación ha mostrado ser útil como estimador del factor capacidad de P en suelos de México,

Brasil y Argentina (Boschetti et al., 1998). Para K, la TR<sub>ext</sub> considera la capacidad de intercambio catiónica total (T) y el porcentaje de arcilla. Las tasas de recuperación por los extractantes para Ca y Mg son valores constantes.

La demanda nutricional se calculó con base en ecuaciones alométricas ajustadas por (Stahinger, 2017). Este tipo de ecuaciones han sido ajustadas también para macro y micronutrientes de *E. grandis* (clonal), *P. taeda* y *P. híbrido*. Dichas ecuaciones permiten estimar el contenido de nutrientes en cada componente por árbol (Tabla 3).

La demanda de cada nutriente se calculó según la sumatoria de los contenidos del nutriente en todos los órganos del árbol y multiplicando este valor por el número de árboles por hectárea. Como en este trabajo se muestreo la parte aérea de los árboles, las ecuaciones ajustadas permitieron estimar los contenidos de

**Tabla 3. Ecuaciones alométricas para estimar contenidos de N, P, K, Ca y Mg (en g árbol<sup>-1</sup>) de los componentes de la parte aérea de *E. grandis* (seminal) en Corrientes, Argentina (Stahinger, 2017).**

Nutriente	Componente	Ecuación	R <sup>2</sup>
N	Hojas	$\hat{y} = 34.581 e^{0.0791 dap}$	0.7795
	Ramas	$\hat{y} = 8.8358 e^{0.1043 dap}$	0.8890
	Madera	$\hat{y} = 0.0506 dap^{2.5202}$	0.9835
	Corteza	$\hat{y} = 0.0394 dap^{2.3137}$	0.9825
P	Hojas	$\hat{y} = 0.3465 dap^{1.1831}$	0.7627
	Ramas	$\hat{y} = 0.1107 dap^{1.5734}$	0.8457
	Madera	$\hat{y} = 0.0104 dap^{2.2632}$	0.9598
	Corteza	$\hat{y} = 0.0036 dap^{2.5474}$	0.9231
K	Hojas	$\hat{y} = 9.458 e^{0.0865 dap}$	0.8424
	Ramas	$\hat{y} = 9.6758 e^{0.1002 dap}$	0.8319
	Madera	$\hat{y} = 0.1099 dap^{2.2796}$	0.9777
	Corteza	$\hat{y} = 0.0346 dap^{2.4627}$	0.9569
Ca	Hojas	$\hat{y} = 1.7937 dap^{1.3616}$	0.7734
	Ramas	$\hat{y} = 11.754 e^{0.1087 dap}$	0.9135
	Madera	$\hat{y} = 0.0392 dap^{2.6135}$	0.9861
	Corteza	$\hat{y} = 0.077 dap^{2.8346}$	0.9692
Mg	Hojas	$\hat{y} = 2.8454 e^{0.0915 dap}$	0.8344
	Ramas	$\hat{y} = 1.3583 e^{0.121 dap}$	0.9140
	Madera	$\hat{y} = 0.0119 dap^{2.3414}$	0.9860
	Corteza	$\hat{y} = 0.0158 dap^{2.4955}$	0.9707

**Tabla 4. Contenido de nutrientes por órgano y por árbol, y demanda nutricional de un rodal de *E. grandis* (seminal) con 1000 árboles ha<sup>-1</sup> para alcanzar un IMA<sub>tronco</sub> = 35 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> a los 4 años.**

Nutriente	Hojas	Ramas	Madera	Corteza	Parte aérea	Raíces	Árbol	Rodal
	g árbol <sup>-1</sup>							kg ha <sup>-1</sup>
N	119.2	45.2	51.8	22.9	239.1	37.6	276.7	276.7
P	9.0	8.4	5.3	4.0	26.6	2.5	29.0	29.0
K	36.6	46.4	58.1	30.2	171.3	26.3	197.6	197.6
Ca	75.9	64.4	51.9	187.2	379.3	30.6	409.9	409.9
Mg	11.9	9.0	7.5	15.1	43.5	19.4	62.9	62.9

nutrientes en los componentes de dicha parte (Tabla 3). A su vez, con base en datos de literatura sobre proporción de nutrientes en las raíces (Reis et al., 1987; Neves, 2000; Barros Filho, 2003; Witschoreck, 2008), se consideró también la cantidad de cada nutriente localizada en este órgano y, así, estimar la demanda total para cada nutriente en el árbol completo. A continuación, se explica un ejemplo con K para facilitar la comprensión de esta lógica.

K en hojas = 36.6 g árbol<sup>-1</sup> = 0.0366 kg árbol<sup>-1</sup> x 1000 árboles ha<sup>-1</sup> = 36.6 kg ha<sup>-1</sup>

K en ramas = 46.4 g árbol<sup>-1</sup> = 0.0464 kg árbol<sup>-1</sup> x 1000 árboles ha<sup>-1</sup> = 46.4 kg ha<sup>-1</sup>

K en madera = 58.1 g árbol<sup>-1</sup> = 0.0581 kg árbol<sup>-1</sup> x 1000 árboles ha<sup>-1</sup> = 58.1 kg ha<sup>-1</sup>

K en corteza = 30.2 g árbol<sup>-1</sup> = 0.0302 kg árbol<sup>-1</sup> x 1000 árboles ha<sup>-1</sup> = 30.2 kg ha<sup>-1</sup>

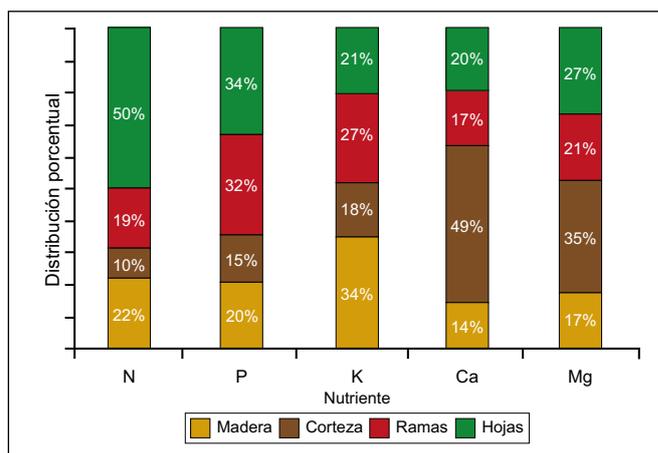
K en parte aérea = 36.6 + 46.4 + 58.1 + 30.2 = 171.3 kg ha<sup>-1</sup>

Demanda total de K = [171.3 kg ha<sup>-1</sup> / (100-13.3)] x 100 = 197.6 kg ha<sup>-1</sup>

En este ejemplo, 13.3% del K de los árboles está en las raíces. La demanda total de K para alcanzar una meta de productividad de 35 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> a los 4 años es de 197.6 kg ha<sup>-1</sup>.

De la misma manera que fue ejemplificado para K, se calculan los contenidos y la demanda de los otros nutrientes (Tabla 4). A partir de los contenidos de nutrientes en la parte aérea se calculó cómo estos se distribuyeron en la parte que será cosechada al final del ciclo (Figura 3). Cabe destacar que la parte que será cosechada varía según el sistema de cosecha empleado.

A partir de la Figura 3, y si bien es en una edad joven (4 años), es posible evidenciar que el sistema de cosecha empleado, extracción del fuste entero (madera + corteza) o del árbol entero (madera + corteza + ramas + hojas), tiene una gran influencia en cuanto a la exportación de nutrientes que se haga, tal como ha sido demostrado también para *P. taeda* (Goya et al., 2003; Martiarena et al., 2011). En realidad, el producto de interés comercial es la madera, con lo cual la mejor recomendación, buscando exportar menos nutrientes con la cosecha, es la de dejar no solo hojas y ramas en el campo sino también la corteza



**Figura 3. Distribución porcentual de nutrientes en los compartimentos de la parte aérea de un rodal de *E. grandis* (seminal) con 4 años.**

debido a la elevada concentración de nutrientes que posee este compartimento, principalmente Ca y Mg (Figura 3). Cabe destacar que la concentración de nutrientes en la corteza es mayor en eucalyptus que en pino (Stahring, 2017). En esta misma línea, y trabajando con un banco de datos de 1217 árboles de eucalyptus muestreados en 20 regiones de Brasil, Santana et al. (2008) observaron que la corteza representa, en promedio, 13% del fuste entero (considerando edades de 4.5 años a 8.5 años) y contiene 72% del Ca, 66% del Mg, 47% del P, 43% del K y 30% del N en relación al total de nutrientes exportados en la cosecha del fuste entero. Estos mismos autores destacaron que la amplitud de variación de contenido de nutrientes en la corteza, en kg ha<sup>-1</sup>, considerando diferentes productividades, fue de: 33 a 74 (N), 5 a 10 (P), 30 a 83 (K), 70 a 405 (Ca) y 12 a 46 (Mg). Dichas cantidades equivalen, en kg ha<sup>-1</sup>, a: 70 a 160 kg urea ha<sup>-1</sup>, 25 a 50 kg fosfato diamónico ha<sup>-1</sup>, 60 a 166 kg cloruro de potasio ha<sup>-1</sup> y 229 a 1517 kg dolomita ha<sup>-1</sup>. Estos números denotan la importancia de la corteza como destino de nutrientes dentro de los árboles estudiados, siendo que en la mayoría de los casos este compartimento es retirado del campo con la cosecha cuando no es el órgano de interés real para la industria.

Actualmente, existe una tendencia creciente de proyectos para obtener energía eléctrica a partir de residuos forestales (residuos de cosecha, podas, raleos, etc.). Desde un punto de vista estrictamente económico puede ser considerado como un aprovechamiento de un material hasta ahora inutilizado (Mazzuchelli y Moroni,

**Tabla 5. Balance nutricional para llegar a las recomendaciones de nutrientes, en kg ha<sup>-1</sup> de cada nutriente, en los sitios 1 y 2.**

Nutriente	Suministro	Demanda	Balance nutricional	Fertilización de implantación	TR <sub>planta</sub>	Recomendación
			kg ha <sup>-1</sup>			kg ha <sup>-1</sup>
Sitio 1						
N	526	277	250	-	-	0
P	26	29	-3	-17.5	0.53	40
K	251	198	53	-	-	0
Ca	3111	410	2701	-	-	0
Mg	515	63	452	-	-	0
Sitio 2						
N	369	277	92	-	-	0
P	9	29	-20	-17.5	0.53	70
K	87	198	-110	-	0.71	155
Ca	307	410	-103	-	0.37	275
Mg	265	63	202	-	-	0

2013). Lo importante es destacar que en caso de que el aprovechamiento de los árboles sea integral o de que la cosecha realizada lleve a la retirada total de la parte aérea de los árboles, esto implicará que la cantidad de nutrientes exportados en cada ciclo necesariamente será mayor. Los sistemas productivos siempre serán interesantes cuando sean rentables, pero para que el análisis económico sea completo, se debería contemplar también el costo de reposición de los nutrientes exportados en busca de mantener la calidad de los sitios.

En el sitio 1 (sitio de mayor fertilidad), se observa que el suelo tiene la capacidad suministrar las cantidades demandadas de N, K, Ca y Mg, pero que se debe fertilizar con P (**Tabla 5**). La recomendación de dicho nutriente, en kg P ha<sup>-1</sup> (multiplicar por 2.29 para pasar a P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), se obtiene al dividir la demanda (3 + 17.5) por la TR<sub>planta</sub> para P. Para estimar la TR<sub>planta</sub> se utiliza la determinación de P-rem (Alvarez et al., 2000), o se estima a partir del porcentaje de arcilla (Freire, 2001). Se debe utilizar una fuente soluble de P, por ejemplo fosfato monoamónico, y la aplicación del mismo debe ser incorporado al suelo (en surco continuo u hoyos laterales a la planta) inmediatamente previo a la implantación o hasta una semana después de la misma (Santana et al., 2014). La localización del P cobra aun mayor importancia en suelos rojos de Misiones y el norte de Corrientes, muy utilizados para plantaciones forestales, ya que la fijación de P por parte de estos suelos es elevada (Quintero et al., 1999). Además, por lo que se observa en el balance de K, es probable que en el próximo ciclo se pueda tener respuesta positiva a la fertilización potásica en este sitio, ya que la cantidad que el suelo posee de este nutriente apenas cubre la demanda del ciclo actual.

Ya en el sitio 2 (sitio de menor fertilidad), el balance nutricional dio negativo para P, K y Ca, indicando que en este sitio el suministro de estos nutrientes no es suficiente para que el cultivo alcance la meta de productividad sin que el aspecto nutricional sea una limitante (**Tabla 5**). Como se indicó anteriormente, para llegar a las recomendaciones de la cantidad de cada nutriente que debe ser aplicada vía fertilizante se divide el valor absoluto obtenido del balance nutricional del mismo por su respectiva TR<sub>planta</sub>. Para P, tener en cuenta que experiencias en diferentes empresas forestales de Brasil demuestran que no hay respuesta a la fertilización para dosis superiores a 150 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> vía fertilizantes solubles. Por lo tanto, debe considerarse ese valor como mayor dosis a ser recomendada para este nutriente. Las TR<sub>planta</sub> de K y Ca consideran la dosis aplicada, siendo que cuanto mayores son las dosis aplicadas, menores son los valores de dichas tasas (Stahring, 2017). La aplicación de K debe hacerse dividida en 3 veces, una pequeña dosis en la implantación (por ejemplo 6:30:6) y las restantes en los siguientes 2-3 años del cultivo como indican Barros y Novais (1996). Dividir la dosis de K cobra aún mayor importancia en suelos arenosos, como el de este sitio, ya que poseen baja C.I.C. y esto favorece importantes pérdidas por lixiviación en caso de no dividir la dosis recomendada. Además para eucalyptus no se recomiendan dosis mayores que 120 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O en una sola aplicación (Santana et al., 2014). Respuestas importantes a la aplicación de K en suelos pobres en este nutriente han sido encontradas para eucalyptus (Silveira & Malavolta, 2000; Barros et al., 2014). Por su parte, el Ca debe ser aplicado en un lapso de tiempo que va desde antes de la implantación hasta los 6 meses posterior a la misma (Santana et al., 2014). Como fuente de Ca se recomienda usar calcáreos dolomíticos cuando Mg <

0.20 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> (Barros et al., 2014). En el caso de este ejemplo como la concentración es mayor que ese valor (Tabla 1), se recomienda utilizar un calcáreo sin Mg.

La comparación planteada en este ejemplo entre dos sitios forestales de fertilidad diferente permite vislumbrar que puede ser interesante utilizar esta lógica de balance nutricional no solo para recomendación de fertilizantes, sino también para la diagramación de experimentos. Considerar tanto la estimación de la demanda nutricional como la diferenciación de sitios de acuerdo a su fertilidad puede ayudar a entender mejor diferentes potenciales de respuesta a la fertilización según las características de los sitios.

Al realizar un cultivo forestal en un determinado sitio parte de los nutrientes son exportados con la cosecha. Es evidente que esa cantidad no equivale a toda la demanda nutricional estimada puesto que, independiente del sistema de cosecha empleado siempre las raíces quedarán en el campo, y con ellas algunos nutrientes (Tabla 4). Sin embargo, la mayor cantidad de nutrientes está presente en la parte aérea de los árboles y, por ello, cuanto mayor sea la cantidad de residuos que se dejen el campo menor será la cantidad de nutrientes exportados. Consecuentemente, menor será la cantidad de nutrientes que necesitaran ser reintegrados al sistema para mantener la sustentabilidad de la producción forestal. Trabajos como este sirven no solo para recomendar fertilizantes sino también para entender mejor la demanda, suministro y exportación de nutrientes. Seguramente al igual que Cruzate y Casas (2017) citan para cultivos de granos en Argentina, una elevada proporción de los nutrientes que son exportados por las cosechas forestales no son devueltos vía fertilización. Debemos ser conscientes de que esto está llevando al agotamiento de la fertilidad de los suelos forestales y provocará una disminución de las productividades al cabo de algunas rotaciones. Además, la tendencia en el país, y en general a nivel mundial, de acortar los turnos de corte para producir mayor volumen de madera en menos tiempo, lleva a una mayor exportación de nutrientes, debido a un menor ciclo biogeoquímico de los mismos, como fue señalado por ejemplo por Martiarena (2016) para *Pinus taeda*. Ante esta realidad todo indica que, si se quiere mantener la sustentabilidad de la producción forestal en Argentina, con elevadas productividades, habrá que comenzar a fertilizar los rodales de manera a restituir los nutrientes exportados y así mantener la capacidad productiva de los sitios.

### Consideraciones finales

Las dosis de fertilizantes a utilizar deben tener en cuenta la demanda nutricional vinculada a una meta de productividad y el suministro de nutrientes relacionado con el análisis de suelo previo a la plantación del cultivo.

Comprender bien la demanda de nutrientes según la especie forestal y fase del cultivo, así como el suministro de nutrientes según el sitio forestal, son aspectos que

ayudan a entender mejor la respuesta a fertilizantes en cultivos forestales.

Conocer la disponibilidad de nutrientes en los suelos y la cantidad exportada con cada cosecha nos permitirá saber cuan sustentable es nuestro sistema productivo y cuantas rotaciones “tolerará” cada sitio forestal sino reponemos los nutrientes exportados.

### Agradecimientos

Al Departamento de Suelos de la UFV, al programa PEC-PG del Ministerio de Relaciones Exteriores de Brasil, al Ministerio de Producción de Corrientes, a las empresas forestales Bosques del Plata, EVASA, MASISA, Pomera Maderas y Zeni, al INTA, a la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Nordeste y al Servicio Meteorológico Nacional. Un agradecimiento especial para cada uno por su contribución para la realización de este trabajo.

### Bibliografía

- Alvarez V., V.H., R.F. Novais, L.E. Dias, y J.A. Oliveira. 2000. Determinação e uso do fósforo remanescente. Boletim Informativo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo 25(1):27-32.
- Aparicio, J.L., F. Larocca y F. Dalla Tea. 2005. Silvicultura de establecimiento de *Eucalyptus grandis*. IDIA XXI. 66-69 pp.
- Argentina, Ministerio de Modernización. 2018. Inventario nacional de plantaciones forestales por superficie. <http://datos.gob.ar/dataset/inventario-nacional-plantaciones-forestales-por-superficie>
- Bahia Filho, A.F.C., J.M. Braga, A.C. Ribeiro, y R.F. Novais. 1983. Sensibilidade de extratores químicos à capacidade tampão de fósforo. Rev Bras Ciência do Solo 7:243-249.
- Barros, N.F., J.C.L. Neves, y R.F. Novais. 2014. Nutrição e Adubação Mineral do Eucalipto. En: Vale, A.B., C.C. Machado, J.M.M. Pires, M.B. Vilar, C.B. Costa y A.N. Nacif (ed.). Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência. Viçosa. SIF. Cap 9:187-208.
- Barros, N.F., y R.F. Novais. 1996. Eucalypt nutrition and fertilizer regimes in Brazil. En: Atwill, P.M. y M.A. Adams (ed.). Nutrition of eucalyptus. Australia: CSIRO. pp. 335-355.
- Barros, N.F., R.F. Novais, J.L. Teixeira, y E.I. Fernandes Filho. 1995. NUTRICALC 2.0 - Sistema para cálculo del balance nutricional y recomendación de fertilizantes para el cultivo de eucalipto. Bosque 16(1):129-131.
- Barros Filho, N.F. 2003. Sistema de Recomendação de Fertilizantes para o *Pinus taeda* L. (NutriPinus). Universidade Federal de Santa Maria.
- Boschetti, N.G., C.E. Quintero, y R.A. Benavidez. 1998. Caracterização do fator capacidade-tampão de fosfatos em solos de Entre Ríos, Argentina. Rev Bras Ciência do Solo 22:95-99.
- Cruzate, G.A., y R.R. Casas. 2017. Balance de nutrientes en los suelos agrícolas de la Argentina en la campaña 2015/16. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica 28:14-23.
- Cruzate, G.A., y J.L. Panigatti. 2008. Suelos y ambientes de Corrientes. INTA.

- Elizondo, M.H. 2009. Primer Inventario Forestal de la provincia de Corrientes.
- Elizondo, M.H. 2015. Actualización del Inventario de Plantaciones Forestales de la provincia de Corrientes. Consejo Federal de Inversiones - provincia de Corrientes.
- Escobar, E.H., H.D. Ligier, R. Melgar, H. Matteio, y V. Vallejos. 1996. Mapa de Suelos de la provincia de Corrientes 1:500.000. Corrientes: Área de Producción Vegetal y Recursos Naturales E.E.A. INTA - Corrientes.
- Fernández, R., F. Rodríguez Aspillaga, A. Lupi, A. Hernández y H. Reis. 1999. Efectos de diferentes prácticas de preparación del terreno y fertilización sobre el crecimiento inicial del *Pinus* spp en el NE argentino. *Bosque* 20:47-55.
- Freire, F.J. 2001. Sistema para cálculo do balanço nutricional e recomendação de corretivos e fertilizantes para cana-de-açúcar. Universidade Federal de Viçosa.
- Gonçalves, J.L.M., K.C.F.S. Mendes, y C.M. Sasaki. 2001. Mineralização de Nitrogênio em ecossistemas florestais naturais e implantados do estado de São Paulo. *Rev Bras Ciência do Solo* 25(3):601-616.
- Goya, J.F., C. Pérez, J.L. Frangi, y R. Fernández. 2003. Impacto de la cosecha y destino de los residuos sobre la estabilidad del capital de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* L. *Ecología Austral* 13:139-150.
- Ibañez, C., P. Nuñez, R. Pezutti y F. Rodríguez. 2004. Efectos de la roturación del suelo y fertilización con fósforo en el crecimiento inicial de plantaciones de *Pinus taeda*, en suelos rojos del Noreste de la provincia de Corrientes, Argentina. *Bosque* 25(2):69-76.
- Landsberg, J.J., y R.H. Waring. 1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *For Ecol Manage* 95:209-228.
- Larocca, F., F. Dalla Tea, y J.L. Aparicio. 2004. Técnicas de implantación y manejo de *Eucalyptus grandis* para pequeños y medianos forestadores en Entre Ríos y Corrientes. XIX Jornadas Forestales de Entre Ríos. VII 1-16.
- Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. 2nd Edition. London: Academic Press.
- Martiarena, R.A. 2016. Efecto de la disponibilidad de recursos sobre la eficiencia de uso y conservación de los nutrientes en función de las condiciones edafoclimáticas, edad y manejo de las plantaciones de *Pinus taeda* L. en la Mesopotamia Argentina. Universidad Nacional de La Plata - Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales.
- Martiarena, R.A., M.A. Pinazo, A. Von Wallis, O. Knebel, y N.M. Pahr. 2011. Alternativas de manejo silvícola para la conservación de nutrientes en sistemas forestales en Misiones, Argentina. *Ciencia del Suelo. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo* 29:39-48.
- Martiarena, R.A., A. Von Wallis, y O. Knebel. 2009. Pérdida de nutrientes durante la cosecha y el establecimiento forestal, en un rodal de *Pinus taeda* en Misiones, Argentina. *Revista Forestal Venezolana* 53(2):165-173.
- Mazzuchelli, T.A., y P.T. Moroni. 2013. Tratamientos de residuos forestales. UADE.
- Nambiar, E.K.S. 1983. Root development and configuration in intensively managed *radiata pine* plantations. *Plant Soil* 71:37-47.
- Neves, J.C.L. 2000. Produção e partição de biomassa, aspectos nutricionais e hídricos em plantios clonais de eucalipto na região litorânea do Espírito Santo. Universidade Estadual do Norte Fluminense.
- Novais, R.F., V.H. Alvarez V., N.F. Barros, R.L.F. Fontes, R.B. Cantarutti, y J.C.L. Neves. 2007. Fertilidade do Solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Novais, R.F., N.F. Barros, y J.C.L. Neves. 1986. Interpretação de análise química do solo para o crescimento e desenvolvimento de *Eucalyptus* spp. - níveis críticos de implantação e de manutenção. *Rev Árvore*. 10(1):105-111.
- Quintero, C.E., G.N. Boschetti, y R.A. Benavidez. 1999. Phosphorus Retention in Some Soils of the Argentinean Mesopotamia. *Commun Soil Sci Plant Anal* 30(9-10):1449-1461.
- Reis, M.G.F., N.F. Barros, y J.P. Kimmins. 1987. Acúmulo de nutrientes em uma sequência de idade de *Eucalyptus grandis* W. Hill (ex Maiden) plantado no cerrado, em duas áreas com diferentes produtividades, em Minas Gerais. *Rev Árvore* 11(1):1-15.
- Santana, R.C., N.F. Barros, R.F. Novais, H.G. Leite, y N.B. Comerford. 2008. Alocação de nutrientes em plantios de eucalipto no Brasil. *Rev Bras Ciência do Solo* 32:2723-2733.
- Santana, R.C., I.C.I. Fontan, y S.L. Oliveira. 2014. Implantação, manutenção e produtividade dos povoamentos. En: Vale, A.B., C.C. Machado, J.M.M. Pires, M.B. Vilar, C.B. Costa y A.N. Nacif (ed.). *Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência*. Viçosa. SIF. Cap. 8:161-186.
- Silveira, R.L.V.A., y E. Malavolta. 2000. Nutrição e adubação potássica em eucalyptus. *Informações Agrônômicas* 91:1-12.
- Stahinger, N.I. 2017. Parametrização de modelos de produtividade e de balanço nutricional para *Pinus* e *Eucalyptus* em Corrientes, Argentina. Universidade Federal de Viçosa.
- Stahinger, N.I., J.C.L. Neves, B.F. Martins, B.G. Andrade, J.P. Caliman, y C.A.A.S. Ribeiro. 2014. Índice de Qualidade de Sitio (IQS) como forma de prever o requerimento nutricional para eucalipto. *FertBio* 2014. Araxá, MG.
- Stanford, G., y S.J. Smith. 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sci Soc Amer Proc.* 36(3):465-472.
- Witschoreck, R. 2008. Biomassa e nutrientes no corte raso de um povoamento de *Pinus taeda* L. de 17 anos de idade no município de Cambará do Sul - RS. Universidade Federal de Santa Maria. ✨

# El balance de fósforo del suelo determina los cambios en el nivel de fósforo extraíble\*

F.A. Sucunza<sup>1</sup>, F.H. Gutiérrez-Boem<sup>1</sup>, F.O. García<sup>2</sup>, M. Boxler<sup>3</sup>, y G. Rubio<sup>1</sup>

- En cinco sitios de ensayo a largo plazo se determinó la tasa de disminución del compartimento de P-Bray en tratamientos no fertilizados y el enriquecimiento del mismo compartimento en suelos fertilizados.
- Las tasas de disminución en suelos no fertilizados respondieron a un modelo de disminución curvilíneo que describe la relación entre el P-Bray y el balance de P. Los suelos fertilizados con P mostraron una relación recta lineal significativa entre el P-Bray y el balance P acumulado.
- Los datos obtenidos sobre las tasas a las que el P extraíble disminuye o aumenta de acuerdo con el balance, constituye una herramienta útil para predecir los cambios futuros en disponibilidad del nutriente.

## Introducción

Un componente clave para planificar estrategias de manejo de fósforo (P) es saber cuánto aumenta o disminuye el nivel de P extraíble (P-Bray) en función del balance de P en el sistema. Para esto se necesitan funciones que permitan predecir las tasas de cambio del P-Bray en el suelo a partir del balance de P acumulado a lo largo del tiempo. Estas funciones permitirían predecir la tasa de disminución del P-Bray en el suelo en situaciones de ausencia de fertilización fosforada, así como estimar las variaciones del P-Bray en casos de balances positivos de P en el sistema productivo. Alrededor de 5-25% del P aplicado al suelo es absorbido por el cultivo fertilizado (Morel y Fardeau, 1989; Benbi y Biswas, 1999). El resto del fertilizante es retenido por la matriz del suelo, y eventualmente puede estar disponible para los cultivos posteriores. El efecto residual de la fertilización con P depende principalmente del balance de P y de la capacidad de adsorción del suelo (Blake et al., 2003).

En su versión más simple, el balance P se calcula restando la salida principal de P (P exportado en productos cosechados: grano, forraje) de la entrada principal de P (P del fertilizante o abono). Un balance positivo o negativo lleva a una acumulación o una disminución, respectivamente, del P total del suelo. Sin embargo, debido a la fuerte interacción del fosfato con la matriz del suelo, la relación entre el balance de P y el P disponible del suelo no es fácilmente predecible (Ciampitti et al., 2011). Mientras que en muchos experimentos se han observado relaciones lineales rectas entre el balance de P y el P disponible en el suelo (Blake et al, 2000, 2003; Messiga et al, 2010; Ciampitti et al, 2011; Cao et al, 2012; Shen et al, 2014; Díaz y Torrent, 2016), Johnston et al. (2016) observaron una relación curvilínea entre el P disponible y el tiempo en tratamientos donde no se aplicó

P. Algunos estudios destacan que el balance de P del sistema es el factor preeminente que regula la dinámica del P-Bray en el suelo (Blake et al., 2003; Messiga et al., 2015). En este sentido, utilizar el balance acumulado de P en vez del tiempo como variable independiente, permitiría estimar la tasa de aumento o disminución del P disponible independientemente del factor tiempo. Para identificar qué tipo de función es la que mejor representa la disminución del P disponible es muy importante definir la escala de tiempo considerada. Si se analizan periodos de tiempo muy cortos es muy probable que la caída se pueda representar con una recta, ocultando la presencia de tendencias curvilíneas. En este sentido, los experimentos a campo de largo plazo son la mejor herramienta para cuantificar el impacto del balance de P sobre la dinámica del P disponible del suelo.

En el presente reporte, se presentan resultados de una red de ensayos ubicada en la región pampeana norte de Argentina, que se realizaron para determinar el efecto de la fertilización de largo plazo sobre el balance de P y el nivel de P extraíble (P-Bray) en el suelo.

## Materiales y métodos

### Experimento de fertilización a largo plazo

Se utilizaron los resultados de la Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe (CREA Sur de Santa Fe-IPNI-ASP), una red de experimentos de larga duración realizados en campos de la región sur de Santa Fe de CREA (Consortio Regional de Experimentación Agrícola), para evaluar los efectos a largo plazo de diferentes regímenes de fertilización sobre la fertilidad del suelo. La red comenzó en 2000 y en la actualidad comprende cinco sitios bajo siembra directa cuyos suelos presentaban un rango de niveles en P-Bray inicial y otras características (**Tabla 1**). En el presente estudio, se evaluó el periodo entre las temporadas de crecimiento 2000/01 y 2013/14.

\* Versión adaptada de los resultados publicados en Sucunza et al. 2018. *European Journal of Agronomy*, 96: 87-95

<sup>1</sup> IINBA (CONICET UBA) y Cátedra de Fertilidad de Suelos y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Buenos Aires. Av. San Martín 4453C1417DSE Buenos Aires, Argentina

<sup>2</sup> IPNI Latinoamérica Cono Sur, Buenos Aires, Argentina

<sup>3</sup> Consultor privado

Autor de contacto. Correo electrónico: rubio@agro.uba.ar

**Tabla 1. Información de los sitios experimentales, series de suelo, rotación y propiedades del suelo (0-20 cm) al comienzo del periodo experimental (septiembre 2000).**

	Sitio experimental				
	Balducchi	San Alfredo	La Hansa	Lambaré	La Blanca
Tipo de suelo	Hapludol típico	Argiudol típico	Argiudol ácuico	Argiudol típico	Hapludol típico
Serie de suelo	Santa Isabel	Hughes	Bustinza	Los Cardos	La Bélgica
P-Bray (mg kg <sup>-1</sup> )	10.8	11.6	17.7	67.7	16.2
C orgánico (g kg <sup>-1</sup> )	13.5	19.8	12.2	18.7	13.3
pH	5.9	6.0	5.5	5.6	6.6
Textura	franco limosa	franco limosa	franco limosa	franco limosa	franco limosa
Arcilla (%)	11.8	18.0	18.0	20.5	15.5
Limo (%)	53.1	62.0	78.9	76.5	56.4
Arena (%)	35.1	20.0	3.1	3.0	28.1
Rotación	----- Maíz-Trigo/Soja -----		----- Maíz-Soja-Trigo/Soja II -----		

El mismo protocolo experimental se llevó a cabo en todos los sitios (detalles en Ciampitti et al. 2011 y Sucunza et al. 2018). Se compararon dos tratamientos: a) -P, sin aplicación de P; y b) +P, con aplicaciones anuales de P. La dosis de P del tratamiento +P se decidió cada año, de acuerdo a la exportación esperada de la campaña, a la que se le sumaba un 5-10% adicional. En promedio, la dosis anual de P fue de 37 kg P ha<sup>-1</sup>. La fuente de P utilizada fue fosfato monoamónico [11-52 (22 P)-0], aplicado en bandas incorporadas al momento de la siembra. Ambos tratamientos recibieron fertilización con azufre (S) y nitrógeno (N) que variaron entre 17-25 kg S año<sup>-1</sup> y 90-175 kg N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Los cultivos de soja no se fertilizaron con N. Todos los años se tomó una muestra compuesta de suelo de cada parcela (0-20 cm) antes de la fertilización con P y la siembra de trigo, maíz o soja de primera y se la sometió al análisis de P-Bray (Bray et al., 1945).

Los balances del P en el suelo se calcularon a lo largo del periodo experimental como la diferencia entre las entradas y salidas de P, según lo definido por Oenema et al. (2003). Las entradas de P se estimaron anualmente a partir de la dosis de fertilizante utilizada. Las salidas de P se calcularon a partir de los rendimientos de los cultivos y el contenido de P del grano. En aquellos años en los que no se realizaron mediciones de P de grano, se utilizó la concentración promedio de P para cada cultivo, tratamiento y sitio. En promedio de todos los sitios, las concentraciones de P fueron para soja 5.44 (± 0.21) y 6.04 (± 0.09) mg P g<sup>-1</sup>; para maíz 3.09 (± 0.15) y 3.37 (± 0.18) mg P g<sup>-1</sup>, y para trigo 3.68 (± 0.06) y 3.87 (± 0.10) mg P g<sup>-1</sup> (en todos los casos, promedio ± error estándar) para los tratamientos -P y +P, respectivamente.

Para el tratamiento -P (es decir, sin aplicación de P y con balance negativo de P), las relaciones entre los balances de P y el P-Bray se describieron utilizando una función de disminución exponencial para cada sitio:

$$y = a e^{-kx} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde 'y' es el P-Bray, 'a' representa el valor inicial de P-Bray del sitio, 'k' es la tasa relativa de disminución y 'x' el balance de P acumulado (negativo). Las tasas relativas de disminución (k) para los 5 sitios se compararon con un test de F. Como estas cinco 'k' no fueron significativamente diferentes (p > 0.05), se realizó un ajuste global y se obtuvo un modelo con 5 diferentes 'a' (una para cada sitio), pero una sola tasa (una 'k' común para los cinco sitios).

Para poder representar en una sola curva esta relación (P-Bray vs. Balance de P) para los cinco sitios, se utilizó el 'k' común para calcular los desplazamientos horizontales de cada curva necesarios para hacer coincidir las curvas individuales y colocarlas en un eje x extendido, que representaba el balance de P acumulado. El desplazamiento horizontal para cada sitio se calculó con la ecuación:

$$Ci = (\ln a_i - \ln a_{\max}) / k \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde Ci es la constante (balance negativo de P) que se añadió a cada valor x observado en el sitio i, 'a<sub>i</sub>' fue el valor del parámetro 'a' en el sitio i (valor inicial de P-Bray), a<sub>max</sub> fue el parámetro 'a' en el sitio con el valor inicial de P-Bray más alto, y 'k' fue la tasa relativa de disminución, común para los cinco sitios.

Se ajustó una curva combinada de P-Bray en función del eje x modificado (es decir, un balance de P negativo extendido) utilizando la **Ecuación 1**. La curva combinada obtenida amplió y resumió en gran medida la información sobre el balance de P negativo requerido para la disminución de P-Bray.

Además, la "vida media" del P-Bray inicial se estimó como:

$$P_{1/2} = \ln 2 / -k \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde  $P_{1/2}$  fue la cantidad de P a exportar (balance negativo) para que el valor de P-Bray se reduzca a la mitad.

La tasa absoluta de disminución de P-Bray en función del balance de P podría calcularse para cualquier valor dado de P-Bray como:

$$dy/dx = -k \text{ P-Bray} \quad \text{Ecuación 4}$$

Para el tratamiento +P (que en general tuvo balance positivo de P), se describieron las relaciones entre el P-Bray y el balance de P usando una función recta lineal para cada sitio:

$$y = a + b x \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde 'y' fue el P-Bray, 'a' el valor inicial de P-Bray, 'b' la pendiente y 'x' el balance P acumulado. Las pendientes (b) para los 5 sitios se compararon con un test de F. Como estas cinco 'b' no fueron significativamente diferentes ( $p > 0,05$ ), se realizó un ajuste global que resultó en un modelo con 5 diferentes 'a' (una por cada sitio), pero sólo una pendiente (una 'b' común para los cinco sitios).

La 'b' común se utilizó para calcular los desplazamientos horizontales necesarios para hacer coincidir las rectas individuales y representar P-Bray en función de un eje x extendido (balance de P).

El desplazamiento horizontal para cada sitio se calculó con la ecuación:

$$C_i = (a_i - a_{\min}) / b \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde  $C_i$  fue la constante (balance de P positivo) que se añadió a cada valor x observado en el sitio i, 'a<sub>i</sub>' fue el valor inicial de P-Bray en el sitio i,  $a_{\min}$  fue el parámetro 'a' en el sitio con el menor valor inicial P-Bray, y 'b' fue la pendiente, común para los cinco sitios.

Se ajustó una línea combinada de P-Bray en función del eje x modificado (es decir, un balance de P positivo extendido) utilizando la **Ecuación 5**. La línea combinada amplió enormemente la información sobre el balance P positivo requerido para que P-Bray aumentara.

Adicionalmente, la 'tasa de cambio' del P-Bray inicial se estimó como:

$$CR = 1 / b \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde CR indica la cantidad de P que se necesita (por encima del P removido por la cosecha) para aumentar la disponibilidad de P en 1 mg kg<sup>-1</sup>.

## Resultados

### *Relación entre el Balance de P y P-Bray cuando no se agrega P*

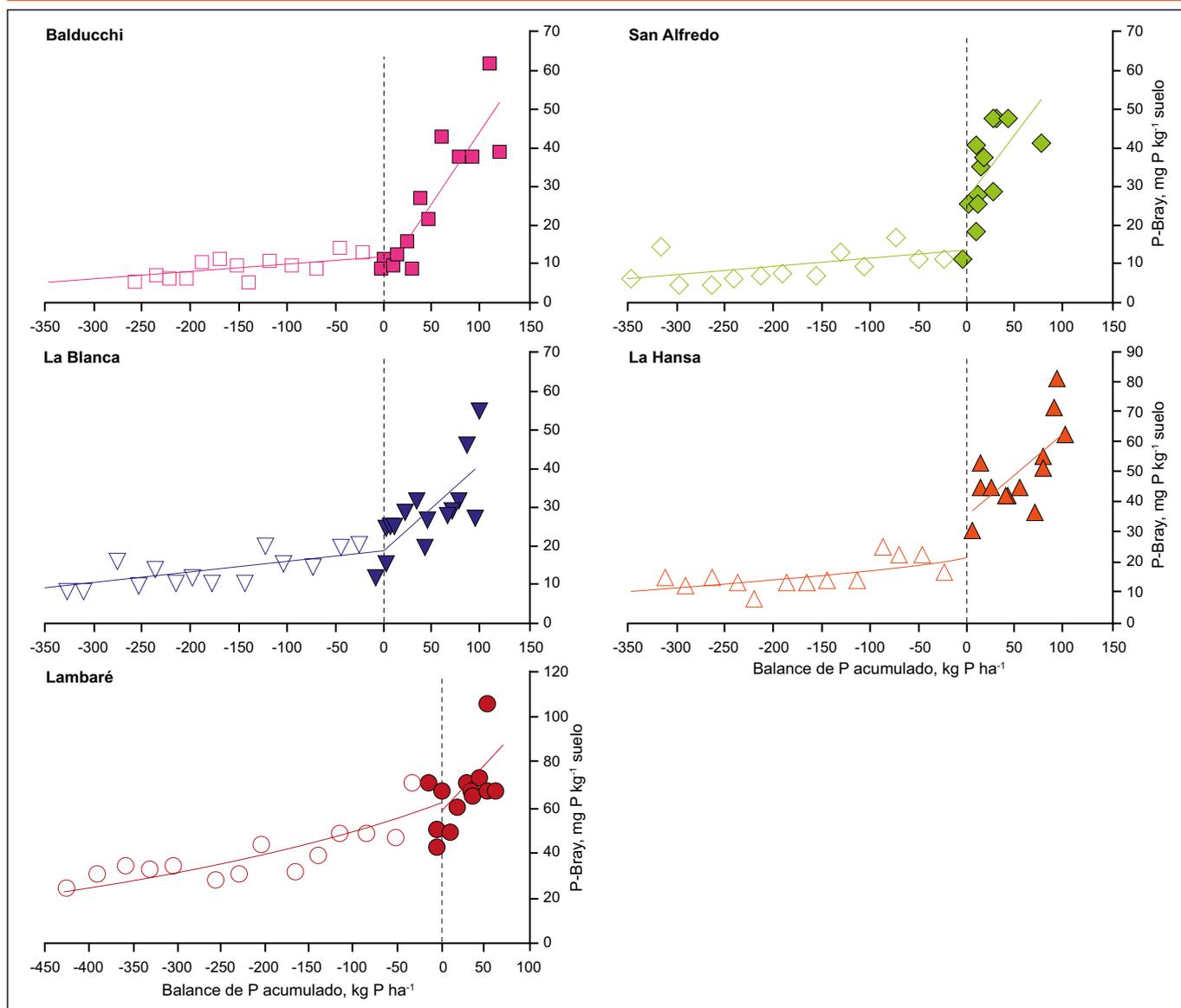
El sitio rico en P, Lambaré, mostró el balance de P más negativo (-453 kg P ha<sup>-1</sup> a lo largo del periodo experimental), seguido de San Alfredo (-369 kg P ha<sup>-1</sup>), La Blanca (-338 kg P ha<sup>-1</sup>), La Hansa (-332 kg P ha<sup>-1</sup>) y

Balducchi (-278 kg P ha<sup>-1</sup>) (**Figura 1**). En los cinco sitios se observó una disminución progresiva del P-Bray, que acompaña a la mayor negatividad de los balances P. Esta disminución pudo describirse adecuadamente ( $p < 0.05$ ) con una función de disminución exponencial asintótica (**Figura 1, Tabla 2**). Los modelos ajustados fueron definidos por dos parámetros: la tasa relativa de disminución 'k' y la constante 'a', que está directamente relacionada con el contenido inicial de P-Bray. Curiosamente, no se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los valores k de los cinco sitios. Los modelos ajustados para cada sitio solo difirieron en el valor de 'a'. Estos resultados nos permitieron ajustar una única función de disminución sobre un eje x extendido después de agrupar los datos de los 5 sitios (**Figura 2**). La vida media promedio de P-Bray para estos suelos fue 327, lo que indica que se necesita una extracción de 327 kg P por hectárea para reducir sus valores iniciales de P-Bray a la mitad, independientemente del valor inicial de P-Bray del suelo. Para los tratamientos -P, el sitio Lambaré, rico en P, mostró la mayor disminución en P-Bray a lo largo del periodo estudiado (de 67.7 a 24.8 mg P kg<sup>-1</sup>: aproximadamente 42.9 mg P kg<sup>-1</sup>). Los otros cuatro sitios, con P-Bray inicial bajo a moderado (< 20mg P kg<sup>-1</sup>), disminuyeron menos de 7 mg P kg<sup>-1</sup> a lo largo del periodo experimental.

### *Relación entre el balance positivo de P y el P-Bray (tratamiento +P)*

Los tratamientos fertilizados mostraron un balance positivo de P en los cinco sitios (**Figura 1**). Al final del periodo experimental, Lambaré y San Alfredo presentaron los balances positivos más bajos (50 y 47 kg P ha<sup>-1</sup>, respectivamente), mientras que Balducchi, La Blanca y La Hansa mostraron valores superiores 79, 108 y 117 kg P ha<sup>-1</sup>, respectivamente. La relación entre el equilibrio de P-Bray y P pudo describirse mediante modelos de regresión lineal simples ( $y = a + b x$ ) (**Figura 1, Tabla 2**). Los modelos individuales para cada sitio diferían en el valor de 'a', pero no hubo diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre las pendientes 'b' (**Tabla 2**). Esto indica que las tasas de aumento de P-Bray fueron similares entre sitios, pero cada sitio partió de diferentes valores iniciales de P-Bray (reflejados por valores 'a'). Por lo tanto, fue posible ajustar un único modelo después de agrupar los datos de los cinco sitios. Esta función combinada se trazó en un eje x extendido (**Figura 3**) e indicó que fue necesaria la adición de 3,2 kg P ha<sup>-1</sup> por encima de la extracción de P por cosecha para aumentar P-Bray en 1 mg kg<sup>-1</sup> para este tipo de suelos.

Los sitios con P-Bray inicial bajo a moderado (< 20 mg kg<sup>-1</sup>) mostraron un aumento algo similar en el P-Bray después de 14 años de fertilización continua. Los aumentos relativos observados sobre los valores iniciales fueron de 258, 249, 241 y 249% para Balducchi, San Alfredo, La Blanca y La Hansa, respectivamente. Por el contrario, el sitio con el contenido de P-Bray inicial más alto (67.7 mg P kg<sup>-1</sup>, Lambaré) tuvo un incremento relativo menor sobre el valor inicial de P-Bray al final del periodo experimental.



**Figura 1. Relación entre P-Bray y balance acumulado de P durante el experimento (14 años) para los 5 sitios del norte de la región pampeana. Los símbolos abiertos representan el tratamiento no fertilizado con P (-P) y los símbolos llenos el tratamiento con fertilización fosforada (+P). Todas las funciones ajustadas fueron estadísticamente significativas para  $p < 0.05$ . Los parámetros de las funciones ajustadas se muestran en la Tabla 2.**

## Discusión

### *Disminución residual de P con balances negativos de P*

Estudios recientes de largo plazo han encontrado relaciones rectas lineales entre la disminución de P-Bray y el balance de P (Selles et al., 2011; Cao et al., 2012; Shen et al., 2014; Messiga et al., 2015). En la misma línea, otros estudios determinaron que la relación entre el balance de P y las variaciones de P-Bray estaba regulada principalmente por el P-Bray inicial (Ciampitti et al., 2011; Johnston et al., 2016). En las parcelas -P de nuestros cinco sitios, la disminución del pool de P-Bray fue mejor descrita por funciones de disminución exponencial (Figura 1) que por rectas. El rango de balance de P negativo acumulado observado en nuestro estudio fue mayor (hasta -450 kg P) que los de la mayoría de los informes anteriores, lo que habría facilitado la identificación de relaciones curvilíneas. Es interesante que las curvaturas de las 5 funciones fueron similares y por ello fue posible ajustar

una función curvilínea de disminución común a los cinco sitios (Figura 2). El parámetro 'a', que es la intercepción en el eje y, difería entre los sitios, lo que es coherente con el hecho que cada sitio partió de diferentes valores iniciales de P-Bray (de 10.8 a 67.7 mg kg<sup>-1</sup>) (Figura 2, Tabla 2). La ecuación obtenida es adecuada para predecir la disminución del P extraíble después de cesar las prácticas de fertilización con P. La evaluación de la vida media de P-Bray estimada a partir de la función combinada obtenida indicó que se necesitó una extracción neta de 327 kg de P por hectárea para reducir a la mitad los valores iniciales de P-Bray, independientemente de la magnitud de éstos. La relación entre el balance de P neto y la disminución de P-Bray del suelo está regulada por las propiedades físico-químicas del suelo, el clima y la disponibilidad de otros nutrientes (Blake et al., 2000). En suelos pampeanos, se han identificado al contenido de arcilla, el P-Bray inicial, el aluminio y hierro amorfo como los componentes clave que determinan la retención de P por parte del suelo

**Tabla 2. Ecuaciones ajustadas para la relación entre P-Bray y balance acumulado de P para los cinco sitios del Norte de la Región Pampeana. Se pueden ver las funciones individuales (Figura 1) y combinadas (Figura 2 y 3) para los tratamientos -P y +P.**

Balance	----- Tratamientos -P -----						----- Tratamientos +P -----					
	Ecuación			$y = a \exp(kx)$			Ecuación			$y = a + bx$		
Ajuste	-- Ajuste individual por sitio --			----- Ajuste global -----			-- Ajuste individual por sitio --			----- Ajuste global -----		
Sitio	a	k (x10 <sup>-3</sup> )	R <sup>2</sup>	a	k (x10 <sup>-3</sup> )	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
Balducchi	12.5	2.38	0.49	12.4			8.4	0.36	0.80	10.6		
San Alfredo	13.5	2.24	0.32	13.6			26.6	0.33	0.40	26.9		
La Blanca	18.9	1.93	0.53	19.8	2.29	0.93	19.4	0.21	0.55	15.3	0.31	0.79
La Hansa	22.0	2.16	0.51	22.3			34.8	0.28	0.45	33.0		
Lambaré	63.1	2.33	0.78	62.7			57.5	0.43	0.37	60.8		

(Rubio et al., 2008; Cabello et al., 2016). En estos estudios previos se encontraron diferencias importantes entre los suelos ubicados al sur y al norte de la región. Los suelos de este último sector (donde se encuentran los cinco sitios comparados) mostraron una menor capacidad de retención de P que los suelos del sur de la región. Los resultados obtenidos en nuestro estudio sugieren que las diferencias entre las propiedades de los cinco suelos (Tabla 1) no fueron lo suficientemente grandes como para afectar la dinámica del P-Bray en los tratamientos donde no se agregó P (-P).

La disminución curvilínea del P-Bray del suelo a lo largo del eje del balance negativo de P podría explicarse por variaciones en la contribución de los compartimientos de P en el suelo al P absorbido por los cultivos, a medida que el suelo se empobrece en P. Esto significa que, a niveles bajos de P-Bray, una mayor proporción del P absorbido por el cultivo provendría de las reservas de P del suelo (es decir, P del suelo no recuperado por el extractante Bray-1) que a niveles altos de P. Entonces, el descenso en P-Bray fue más pronunciado en suelos ricos en P porque la exportación se basó en las fracciones de P más lábiles, mientras que fue más suave en suelos pobres en P porque dependió más de las fracciones de P no extraíbles con el método Bray-1. La disminución curvilínea del P-Bray se asociaría entonces a los flujos que ocurren entre distintas fracciones de P (extraíbles y no extraíbles por Bray-1) a medida que disminuye la cantidad del P extraíble (McCollum 1991; Johnston et al., 2016).

#### Enriquecimiento del P del suelo con balance positivo de P

Después de 14 años de fertilización continua de P, la acumulación progresiva de balances positivos provocó un aumento proporcional del P-Bray, pudiéndose representar esta relación con funciones rectas lineales en todos los sitios (Figuras 1 y 3). No se encontraron diferencias significativas entre las pendientes ajustadas para cada sitio, lo que sugiere que el aumento de P-Bray no dependió del P-Bray inicial, sino de la magnitud del balance P positivo acumulado. La función combinada indicó que se necesitaron 3.2 kg de P ha<sup>-1</sup> para aumentar el P-Bray en 1 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 4). En investigaciones previas

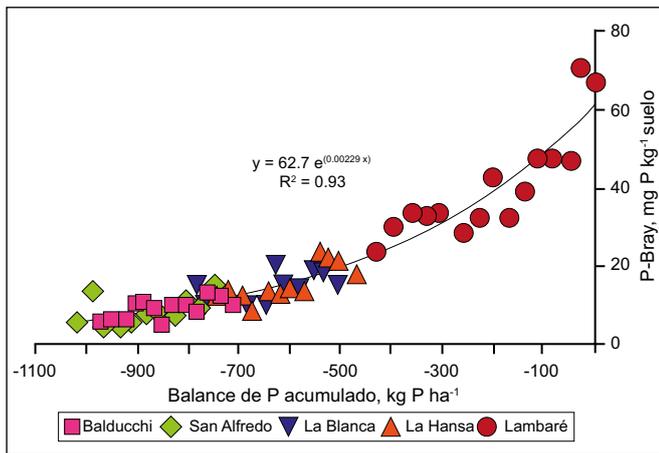
(Blake et al., 2003; Selles et al., 2011; Messiga et al., 2014; Ferraris et al., 2015) también se observaron aumentos lineales en P extraíble en respuesta a balances positivos, aunque McCollum (1991) observó que los suelos ricos en P necesitaban más P para mantener el P disponible del suelo, que los suelos pobres en P. En nuestro estudio, el rango de balance positivo acumulado fue pequeño (+120 kg P ha<sup>-1</sup>), lo cual coincide con Allen y Mallarino (2006), quienes propusieron que las relaciones pueden ser curvilíneas o rectilíneas dependiendo del grado de acumulación de P.

Independientemente del valor de P-Bray inicial, al final del periodo experimental los tratamientos +P de los cinco sitios alcanzaron valores de Bray-P por encima de los valores críticos. Esto significa que la fertilización ya no es necesaria para aumentar los rendimientos en estas parcelas. Sin embargo, incluso en estos casos, los productores no deben abandonar los análisis de suelo porque proporcionan información clave para la nutrición y el cuidado del ambiente.

#### Conclusiones

En los cinco sitios, la tasa de disminución P del compartimiento de P-Bray en los tratamientos no fertilizados se describió por funciones de disminución exponencial. Las curvaturas de las cinco funciones se ajustaron a un modelo de disminución curvilíneo común que describe la relación entre el P-Bray y el balance de P, que es apropiado para predecir la disminución del P extraíble después de discontinuar la práctica de fertilización con P. Los suelos fertilizados con P mostraron una relación recta lineal significativa entre el P-Bray-P y el balance P acumulado. De la misma manera que para las parcelas no fertilizadas, fue posible ajustar un solo modelo después de reunir los datos de los cinco sitios.

Los datos obtenidos sobre las tasas a las que el P extraíble disminuye o aumenta de acuerdo con el balance P constituye una herramienta útil para predecir los cambios futuros de los niveles de P. Esta información puede ser utilizada en la planificación de estrategias de manejo que aseguren que los rendimientos no se vean limitados por la falta de P extraíble, y que minimicen el riesgo de pérdidas de P perjudiciales para el medio ambiente.



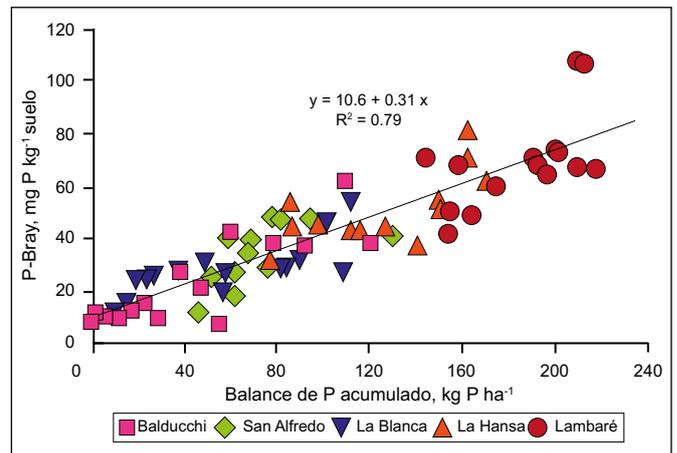
**Figura 2. Relación entre P-Bray y el balance acumulado de P para el tratamiento sin fertilización fosforada (-P) para los cinco sitios del norte de la región pampeana. Los datos mostrados en la Figura 1 indican que la tasa relativa de disminución (k) no difiere entre los cinco sitios comparados. En esta figura, cada sitio se desplazó horizontalmente para hacer coincidir las curvas individuales en una curva combinada de P-Bray en función de un eje x modificado (es decir, un balance de P negativo extendido). La función ajustada fue estadísticamente significativa ( $p < 0.001$ ). Los parámetros del modelo de ajuste global se muestran en la Tabla 2.**

### Agradecimientos

Agradecemos a ASP y a los miembros de la Región CREA Sur de Santa Fe por su valiosa ayuda. El CONICET, la Universidad de Buenos Aires y ANPCYT proporcionaron apoyo financiero.

### Bibliografía

- Allen, B.L., y A.P. Mallarino. 2006. Relationships between Extractable Soil Phosphorus and Phosphorus Saturation after Long-Term Fertilizer or Manure Application. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:454-463.
- Benbi, D.K., y C.R. Biswas. 1999. Nutrient budgeting for phosphorus and potassium in a long-term fertilizer trial. *Nutr. Cycl. Agroecosyst* 54:125-132.
- Blake, L., S. Mercik, M. Koerschens, S. Moskal, P.R. Poulton, K.W.T. Goulding, A. Weigel, y D.S. Powlson. 2000. Phosphorus content in soil, uptake by plants and balance in three european long-term field experiments. *Nutr. Cycl. Agroecosyst* 56:263-275.
- Blake, L., A.E. Johnston, P.R. Poulton, y K.W.T. Goulding. 2003. Changes in soil phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods. *Plant and Soil* 254:245-261.
- Bray, R.H., Kurtz, L.T. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59:39-45.
- Cabello, M.J., F.H. Gutiérrez-Boem, C.E. Quintero, G. Rubio. 2016. Soil Characteristics Involved in Phosphorus Sorption in Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 80:1585-1590.



**Figura 3. Relación entre P-Bray y el balance acumulado de P para los tratamientos fertilizados en cinco localidades de la región pampeana del norte. Los datos mostrados en la Figura 1 indicaron que los cinco sitios tenían una pendiente común. Cada sitio se desplazó horizontalmente para hacer coincidir las líneas individuales en una línea combinada de P-Bray en función del eje x modificado (es decir, un balance de P positivo extendido). La función ajustada fue estadísticamente significativa ( $p < 0.001$ ). Los parámetros del modelo de ajuste global se muestran en la Tabla 2.**

- Cao, N., X. Chen, Z. Cui, y F. Zhang., 2012. Change in soil available phosphorus in relation to the phosphorus budget in China. *Nutr. Cycl. Agroecosys* 94:161-170.
- Ciampitti, I.A., F.O. García, L.I. Picone, y G. Rubio. 2011. Phosphorus budget and soil extraible dynamics in field crop rotations in Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75:131-142.
- Díaz, I., y J. Torrent. 2016. Changes in Olsen P in Relation to P Balance in Contrasting Agricultural Soils. *Pedosphere* 26:636-642.
- Ferraris, G.N., M. Toribio, R. Falconi, y F. Moriones. 2015. Efectos de diferentes estrategias de fertilización sobre los rendimientos, el balance de nutrientes y su disponibilidad en los suelos en el largo plazo. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 19:11-17.
- Johnston, A.E., P.R. Poulton, R.P. White, y A.J. Macdonald. 2016. Determining the longer term decline in plant-available soil phosphorus from short-term measured values. *Soil Use Management* 32:51-161.
- McCullum, R.E. 1991. Buildup and Decline in Soil Phosphorus: 30-Year Trends on a Typic Umprabult. *Agron. J.* 83:77-85.
- Messiga, J., N. Ziadi, D. Plénet, L.E. Parent, y C. Morel. 2010. Long-term changes in soil phosphorus status related to P budgets under maize monoculture and mineral P fertilization. *Soil Use Manage* 26:354-364.
- Messiga, A.J., N. Ziadi, G. Bélanger, y C. Morel. 2014. Relationship between soil phosphorus and phosphorus budget in grass sward with varying nitrogen applications. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 78:1481-1488.

- 
- Messiga, A.J., N. Ziadi, C. Jouany, P. Virkajärvi, R. Suomela, S. Sinaj, G. Bélanger, C. Stroia, y C. Morel. 2015. Soil test phosphorus and cumulative phosphorus budgets in fertilized grassland. *AMBIO* 44:S252-S262.
- Morel, C.H., y J.C. Fardeau. 1989. Native soil and fresh fertilizer phosphorus uptake as affected by rate of application and P fertilizers. *Plant and Soil* 115:123-128.
- Oenema, O., H. Kros, y W. De Vries. 2003. Approaches and uncertainties in nutrient budgets: implications for nutrient management and environmental policies. *European Journal of Agronomy* 20:3-16.
- Rubio, G., F.H. Gutiérrez-Boem, y M.J. Cabello. 2008. Estimating Available Soil Phosphorus Increases after Phosphorus Additions in Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72:1721-1727.
- Selles, F., C.A. Campbell, R.P. Zentner, D. Curtin, D.C. James, y P. Basnyat. 2011. Phosphorus use efficiency and long-term trends in soil available phosphorus in wheat production systems with and without nitrogen fertilizer. *Can. J. Soil. Sci.* 91:39-52.
- Shen, P., M. Xu, H. Zhang, X. Yang, F. Zhang, S. Huang, S. Zhang, y X. He. 2014. Long-term response of soil Olsen P and organic C to the depletion or addition of chemical and organic fertilizers. *Catena* 118:20-27.
- Sucunza, F.A., F.H. Gutiérrez-Boem, F.O. García, M. Boxler, y G. Rubio. 2018. Long-term phosphorus fertilization of wheat, soybean and maize on Mollisols: Soil test trends, critical levels and balances. *European Journal of Agronomy* 96:87-95. ✨

# ¿Cómo mejorar el rendimiento y margen bruto de maíz en ambientes con napa del sudeste de Córdoba, Argentina?

Alejo Ruiz<sup>1</sup>, Federico Pagnan<sup>2</sup>, Cecilia Cerliani<sup>3</sup>, Gabriel Espósito<sup>3</sup>, y Tomás Coyos<sup>1</sup>

- *La oferta hídrica actual (precipitaciones + napa) plantea el desafío de convertir la mayor cantidad de agua en biomasa para mejorar el sistema productivo y disminuir riesgos de anegamientos.*
- *Es necesario optimizar la densidad de siembra de maíz conjuntamente con la fertilización nitrogenada para mejorar la productividad de los ambientes sin déficit hídrico.*
- *Incrementos en la densidad de siembra y en el N permitieron aumentar el rendimiento y el margen bruto en un 13% y 15% respectivamente, disminuyendo además el riesgo de exceso hídrico.*

## Introducción

En los últimos años, la región pampeana argentina se vio afectada por excedentes hídricos y ascenso de las napas freáticas (Bertram y Chiacchiera, 2014). Esta problemática impulsó a productores del sudeste de Córdoba a unirse y convocar a Sistema Chacras de Aapresid (<http://www.aapresid.org.ar/sistemachacras/>), con la finalidad de encontrar una solución a la problemática bajo un sistema coordinado de trabajo. El presente artículo surge de los resultados experimentales de una de las líneas de investigación que actualmente integra el proyecto llamado “Chacra Justiniano Posse”. El mismo tiene como objetivo desarrollar tecnologías que tiendan a convertir la oferta hídrica en producción vegetal que mejore el sistema productivo/empresa agropecuaria. El desafío es mejorar la productividad del sistema en su conjunto y disminuir riesgos de anegamientos temporarios y permanentes a través del aumento del consumo de agua. La problemática es abordada en dos niveles. Uno a nivel rotacional (ajuste de intensidad y diversidad de cultivos), y otro a nivel de cultivo individual (ajuste de tecnologías específicas sobre cada uno). En el presente trabajo se mostrarán resultados relacionados con tecnologías de ajuste de maíz en siembras tempranas.

Los sistemas productivos de la zona están basados en maíz, soja y trigo principalmente. El maíz de fechas tempranas ocupa un lugar hegemónico dentro de la rotación por su generoso aporte de carbono (C) y su rentabilidad actual. Los dos factores que principalmente limitan la producción del maíz en la región pampeana son la oferta de agua y de nitrógeno (N) (Maddonni et al., 2003). La napa freática puede constituirse en un factor de incremento de la productividad debido a la disponibilidad hídrica en la franja capilar que puede aportar más de 200 mm (Cisneros et al., 2014). En la región pampeana se reportaron aportes de agua por parte de napas de hasta el 25% de la demanda en alfalfa (Dardanelli y Collino, 2002) y el 50% de soja (Cisneros et al., 2013). Nosssetto et. al (2009) obtuvieron los máximos

rendimientos relativos de maíz cuando la profundidad promedio de la napa freática se ubicó entre 1.4 a 2.4 m, determinando disminuciones de rendimiento con profundidades menores, probablemente asociado a efectos de anoxia radical y/o salinidad. En segundo lugar, el factor que limita la producción es el N (Maddonni et al., 2003; Echeverría et al., 2015), afectando la tasa de expansión foliar, la eficiencia de interceptación de la radiación (Uhart y Andrade, 1995), y en consecuencia, la tasa de crecimiento y el número de granos.

La densidad de siembra es una práctica de manejo cuyo ajuste es complejo, debido al alto costo de la semilla, y a la interacción con el ambiente y el genotipo. El maíz presenta una densidad de siembra óptima que maximiza el rendimiento (Capristo et al., 2007), y ésta varía de acuerdo a la calidad ambiental. En general, ambientes de mayor potencial maximizan su rendimiento con mayores densidades (Horbe et al., 2013).

En la región este de Córdoba, la densidad comúnmente utilizada en siembras tempranas es de 75 000 semillas ha<sup>-1</sup>, con niveles de N aplicados que rondan los 100 kg ha<sup>-1</sup>. La disponibilidad hídrica y el manejo actual sugieren que podrían aumentarse los rendimientos y el margen bruto del maíz a través del incremento de la densidad de siembra y las dosis de N contribuyendo además a un aumento del consumo de agua y aporte de C al sistema.

Los objetivos del presente trabajo son: a) Evaluar el impacto de variaciones en densidad de siembra y dosis de N sobre el rendimiento y margen bruto del cultivo de maíz en ambientes de alta productividad con influencia de napa freática y b) Generar un modelo de respuesta de rendimiento que contemple la interacción entre la densidad de siembra y el N aplicado para estos ambientes del sudeste de Córdoba.

## Materiales y métodos

Se realizaron seis ensayos a campo próximos a la localidad Justiniano Posse (Departamento Unión, provincia de

<sup>1</sup> Sistema Chacras, Aapresid

<sup>2</sup> AER Justiniano Posse, INTA

<sup>3</sup> Facultad de Agronomía y Veterinaria, UNRC

Autor de contacto. Correo electrónico: alejorz@gmail.com

**Tabla 1. Características y manejo de los sitios experimentales.**

N°	Sitio	Campaña	----- Suelo -----			Fecha de siembra	Genotipo	Antecesor	-- Arrancador* --				Fecha de fertilización
			Serie	Clasificación	Clase				N	P	S	Zn	
1	Cooperativa Agrícola	15/16	Monte Buey	Argiudol Típico	IIc	08-oct	DK7210	Trigo/Soja	17	25	14	1.4	04-nov
2	Agroservicios	16/17	Ordoñez	Hapludol Típico	IIc	23-oct	DK7210	Trigo/Soja	15	30	14	-	03-dic
3	Pérez	16/17	Monte Buey	Argiudol Típico	IIc	10-oct	DK7210	Soja	15	30	14	-	23-nov
4	Rosso	17/18	Ordoñez	Hapludol Típico	IIc	19-sep	DK7310	Trigo/Soja	14	21	12	1.2	13-nov
5	La Comarca	17/18	Monte Buey	Argiudol Típico	IIc	16-sep	DK7210	Trigo/Soja	14	21	12	1.2	20-oct
6	Lucarelli	17/18	Monte Buey	Argiudol Típico	IIc	05-oct	DK7310	Trigo/Soja	16	25	14	1.4	06-nov

\* Expresado en kg ha<sup>-1</sup>

Córdoba, Argentina), en las campañas 2015/16, 2016/17 y 2017/18. Los suelos corresponden a Hapludoles y Argiudoles típicos, serie Ordoñez y Monte Buey, respectivamente, pertenecientes a la clase de capacidad de uso IIc (INTA, 1986), manejados bajo siembra directa y los antecesores fueron soja o trigo/soja dependiendo del sitio. La fecha de siembra varió entre fines de septiembre y mediados de octubre. Los genotipos utilizados fueron 'DK 7310 VT3PRO' y 'DK 7210 VT3PRO' dependiendo del sitio. La siembra se realizó a una distancia entre líneas de 52.5 cm, aplicando en todos los casos N, P y S y en algunos Zn en la línea de siembra (**Tabla 1**).

Previo a la siembra se tomaron muestras de suelo de tres profundidades 0-20, 20-40 y 40-60 cm, compuestas cada una por 20 sub-muestras o piques para realizar los siguientes análisis en laboratorio: (i) 0-20 cm: Materia orgánica (%), N anaeróbico (Nan), N de nitratos (N-NO<sub>3</sub>), P Bray, conductividad y pH; (ii) 20-40 y 40-60 cm: N de nitratos (N-NO<sub>3</sub>). Además, se midió el contenido de agua en el perfil hasta los 2 metros de profundidad o hasta donde se encontraba saturado por la presencia de la napa freática y en cada sitio, se colocó un freatómetro para realizar un seguimiento de la misma.

Se utilizó un diseño experimental en bloques completos aleatorizados, con arreglo en parcelas divididas con dos repeticiones. Se establecieron 4 niveles de fertilización (factor principal): 0 kg N ha<sup>-1</sup>, 60 kg N ha<sup>-1</sup>, 120 kg N ha<sup>-1</sup> y 180 kg N ha<sup>-1</sup>. La fertilización nitrogenada se realizó con urea incorporada en el entresurco cuanto los cultivos se encontraban en V4-V8. A su vez, dentro de cada nivel de fertilización se sembraron 4 franjas con densidades objetivo (factor secundario) diferentes: 50 000, 80 000, 100 000 y 130 000 semillas ha<sup>-1</sup>.

Previo a la cosecha se midió la densidad de plantas lograda en los diferentes tratamientos. El rendimiento se determinó por cosecha mecánica y se corrigió a 14.5% de humedad.

Los datos se analizaron estadísticamente con el programa InfoStat (Di Rienzo et al, 2017). Se realizó una ANAVA para evaluar la interacción entre densidad y dosis de N. Se modeló la respuesta del rendimiento a la variación de la densidad y la dosis de N como un polinomio de segundo grado según la **Ecuación 1**:

$$Y = \beta_0 + \beta_1N + \beta_2D + \beta_3N^2 + \beta_4D^2 + \beta_5ND + \epsilon \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde Y es el rendimiento del maíz (kg ha<sup>-1</sup>),  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ ,  $\beta_4$  y  $\beta_5$ , son los parámetros de la ecuación de regresión, D es la densidad de siembra (miles de plantas ha<sup>-1</sup>), N es la disponibilidad de N (expresada como dosis + N de nitratos a la siembra, kg ha<sup>-1</sup>), y  $\epsilon$  es el término de error de la regresión.

Se calculó el margen bruto para diferentes tratamientos y se determinó la densidad óptima económica y disponibilidad de nitrógeno objetivo para diferentes precios de maíz. Se consideraron eficiencias de logro de stand de plantas 95%, precios actuales de urea (U\$S 400 ton<sup>-1</sup>), bolsa de semillas (U\$S 200 bolsa<sup>-1</sup>), alquiler (U\$S 600 ha<sup>-1</sup>), grano de maíz (U\$S 156 ton<sup>-1</sup>), labor de siembra, pulverizaciones y fitosanitarios (U\$S 280 ha<sup>-1</sup>) y gastos de cosecha y comercialización (7% y 21% de la producción respectivamente). Se considera la densidad óptima económica como aquella por encima de la cual mayores densidades no redundarán en un beneficio económico.

### Descripción campaña climática

En las tres campañas analizadas se observaron diferencias en las precipitaciones totales acumuladas y en su distribución. En la campaña 2015/16 fueron superiores al promedio histórico y se distribuyeron regularmente a lo largo del ciclo de maíz. En la 2016/17 fueron ligeramente inferiores a las históricas, registrándose un periodo de sequía en el mes de noviembre y en la primera quincena de diciembre. Mientras que en la campaña 2017/18, las precipitaciones fueron muy inferiores a los valores

**Tabla 2. Precipitaciones quincenales (mm) de septiembre a febrero en la localidad de Justiniano Posse para las tres campañas de estudio y precipitaciones medias históricas (últimas 30 campañas).**

Campaña	Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre		Enero		Febrero		Total
	1 <sup>ra</sup>	2 <sup>da</sup>											
2015/16	7	0	25	30	55	115	56	58	109	20	23	194	692
2016/17	0	4	73	73	17	0	5	164	108	23	33	96	596
2017/18	35	53	9	25	34	46	23	184	8	25	0	3	445
Histórico	43		92		125		141		124		123		648

**Tabla 3. Resultados de los análisis químicos y contenido hídrico en los diferentes sitios.**

Nº	Sitio	Agua útil a la Siembra	MO %	N-NO <sub>3</sub> kg ha <sup>-1</sup>	Nan mg kg <sup>-1</sup>	P-Bray mg kg <sup>-1</sup>	pH	Prof. napa* m
1	Coop. agrícola	100%	2.60	74	-	17	-	1.0 - 1.5
2	Agroservicios	100%	2.34	59	39	11	6.0	0.7 - 2.0
3	Pérez	91%	2.35	63	43	8	6.0	1.5 - 3.0
4	Rosso	100%	3.73	60	50	11	5.5	1.0 - 2.5
5	La Comarca	100%	3.03	55	60	12	5.9	0.7 - 2.5
6	Lucarelli	100%	2.66	69	56	17	5.7	1.5 - 3.5

\*Rango de variación de la profundidad de la napa durante el ciclo del cultivo de maíz.

históricos, ocurriendo una sequía muy marcada en los meses de enero y febrero (Tabla 2).

### Descripción de suelos y napa freática

Debido a las precipitaciones de septiembre – octubre, todos los sitios se encontraban en capacidad de campo o próximo a ello al momento de la siembra (Tabla 3). Los contenidos de materia orgánica variaron entre 2.3% y 3.0% y los valores de Nan entre 40 y 60 mg kg<sup>-1</sup>. Los niveles de fósforo se encontraron bajos, especialmente en el sitio Pérez. Respecto al N los contenidos variaron entre 60 y 70 kg ha<sup>-1</sup>. En todos los sitios la napa fluctuó a profundidades aprovechables por los cultivos.

### Resultados

#### Rendimientos

El rendimiento medio logrado considerando todos los sitios y tratamientos fue de 12 665 kg ha<sup>-1</sup>. Los rendimientos mínimos se obtuvieron en los tratamientos sin fertilizar (testigos) y variaron entre 9500 y 11 200 kg ha<sup>-1</sup> dependiendo del sitio, mientras que los rendimientos máximos en todos los sitios se obtuvieron con la mayor densidad de plantas evaluada y la mayor dosis de N, alcanzando valores de entre 13 500 y 16 300 kg ha<sup>-1</sup> (Tabla 4).

Se detectó interacción significativa entre la densidad de siembra y la fertilización nitrogenada ( $p < 0.001$ ), no así entre los tres factores evaluados (Sitio\*Densidad\*Dosis de N). Esto posibilitó ajustar un modelo de regresión polinómica para todos los sitios, que consideró la interacción densidad por nitrógeno sobre la determinación

de los rendimientos de maíz.

Se estimaron los parámetros de la ecuación de regresión 1, resultando todos significativos y el coeficiente de determinación del modelo elevado ( $R^2:0.77$ ). El modelo ajustado se presenta en la Ecuación 2:

$$Y = 4940 + 32.29N + 83.41D - 0.103N^2 - 0.571D^2 + 0.239ND + \epsilon \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde Y es el rendimiento del maíz (kg ha<sup>-1</sup>), D es la densidad de siembra (miles de plantas ha<sup>-1</sup>), N es la disponibilidad de N (kg N ha<sup>-1</sup> suelo + fertilizante), y  $\epsilon$  es el término de error de la regresión.

Los mayores rendimientos se obtuvieron con más de 90 000 plantas ha<sup>-1</sup> y niveles de N objetivo superiores a los 210 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 1). Estos tratamientos, en promedio en los 6 sitios evaluados, superaron los 15 000 kg ha<sup>-1</sup>. Con un planteo típico de la zona, (densidad de siembra 75 000 plantas ha<sup>-1</sup> y un nivel de N objetivo de 160 kg ha<sup>-1</sup>), se obtuvieron 13 200 kg ha<sup>-1</sup>, siendo la brecha con el rendimiento alcanzable cercana a los 2000 kg ha<sup>-1</sup> (15%).

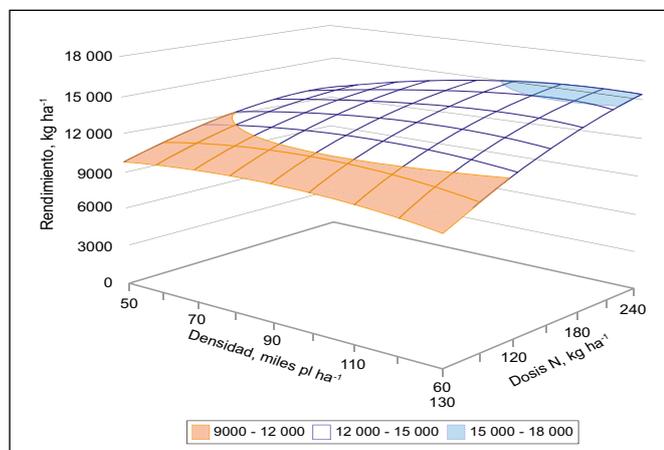
En la Figura 2 se puede apreciar el incremento en la respuesta a la densidad de siembra a medida que aumenta la oferta de N. Por lo tanto, la densidad con la que se maximiza el rendimiento (densidad óptima agronómica) cambió de 85 000 a 130 000 plantas ha<sup>-1</sup> desde la situación testigo a la de mayor disponibilidad de N.

#### Análisis económico

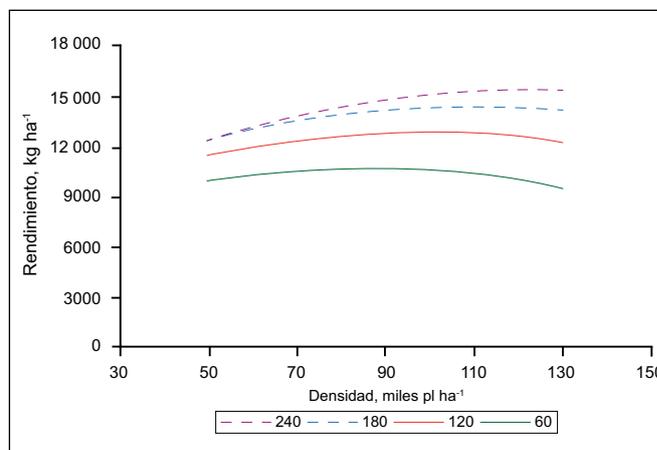
En función del rendimiento estimado (Tabla 5A) con el modelo ajustado en la Ecuación 2, se calculó el margen

**Tabla 4. Medidas resumen del rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>) en los diferentes sitios.**

Rendimiento	Coop. Agrícola	Agroservicios	Pérez	Rosso	La Comarca	Lucarelli
Testigos	9811	10 341	11 178	10 739	9774	9533
Promedio	11 694	12 475	13 249	12 748	12 893	12 933
Máximo	13 511	15 452	16 350	15 904	15 802	16 213



**Figura 1. Modelo de la Ecuación 2: rendimiento en función de la densidad de siembra y dosis de N (suelo + fertilizante).**



**Figura 2. Rendimiento en función de la densidad de siembra para diferentes niveles de N disponible (suelo + fertilizante, kg ha<sup>-1</sup>), según modelo Ecuación 1.**

bruto para cada situación (Tabla 5B). Los mayores márgenes (U\$S 465 y 475 ha<sup>-1</sup>) se obtuvieron con niveles de N próximos a los 240 kg N ha<sup>-1</sup> y densidades comprendidas entre 90 000 y 110 000 plantas ha<sup>-1</sup>. Un punto a destacar es que siembras con alta densidad exigen altos niveles de N disponibles para maximizar rendimientos y márgenes brutos. En situaciones donde se utilice alta densidad de siembra y bajo nivel de N se podrían provocar márgenes brutos negativos. Otro punto de interés es que la diferencia entre el mayor margen bruto con respecto al logrado con el manejo típico de la zona es de U\$S 67 ha<sup>-1</sup> (U\$S 475 vs 408 ha<sup>-1</sup>), es decir un 15% superior.

Considerando tres escenarios de precio de maíz, se calculó el rendimiento esperado, costos, ingresos netos, margen bruto y rendimiento de indiferencia para tres manejos de dosis de N y densidad de siembra (Tabla 6). El planteo típico que se realiza en la zona (75 000 pl ha<sup>-1</sup> y aplicaciones de 100 kg N ha<sup>-1</sup>) no logra maximizar los márgenes en ninguno de los escenarios de precio de maíz. Mientras que con los manejos óptimo económico y recomendado (máxima tasa

de retorno) se hubiesen obtenido entre 30 y 100 U\$S ha<sup>-1</sup> más que con el planteo típico.

### Comentarios finales

El planteo agronómico que se realiza en la zona (75 000 pl ha<sup>-1</sup> y niveles de N disponible de 160 kg N ha<sup>-1</sup> considerando el N disponible a la siembra más el fertilizante) no logra maximizar los rendimientos ni el margen bruto del maíz. Los resultados encontrados en este estudio demostraron que en ambientes con napa es posible aumentar en más de un 10% la productividad y el margen bruto del maíz ajustando correctamente la densidad de siembra y la dosis de N. Ello es posible siempre que se considere la interacción entre la densidad de siembra y la fertilización nitrogenada. Incrementar la densidad de siembra independientemente de la oferta de N puede provocar una disminución del rendimiento y del margen bruto de forma negativa.

El modelo determinado con esta base experimental brinda un ajuste considerable (R<sup>2</sup>: 0.77) lo cual facilitaría la toma de decisiones empresariales sobre la densidad de siembra

**Tabla 5A. Rendimiento de maíz (kg ha<sup>-1</sup>) para diferentes densidades de siembra y niveles de N disponible. Tabla 5B. Margen bruto (U\$S ha<sup>-1</sup>) para diferentes densidades de siembra y niveles de N disponible. Escala rojo-blanco-azul, de menores a mayores valores de rendimiento y margen bruto.**

A	N Disponible suelo+fert., kg ha <sup>-1</sup>			
	60	120	180	240
Densidad, miles pl ha <sup>-1</sup>				
50	9966	11 506	12 303	12 358
70	10 551	12 377	13 461	13 802
90	10 680	12 792	14 162	14 789
110	10 352	12 750	14 407	15 320
130	9568	12 252	14 195	15 395

B	N Disponible suelo+fert., kg ha <sup>-1</sup>			
	60	120	180	240
Densidad, miles pl ha <sup>-1</sup>				
50	\$ 160	\$ 289	\$ 330	\$ 285
70	\$ 176	\$ 339	\$ 414	\$ 402
90	\$ 139	\$ 335	\$ 444	\$ 465
110	\$ 47	\$ 277	\$ 420	\$ 475
130	-\$ 97	\$ 166	\$ 342	\$ 431

**Tabla 6. Rendimiento esperado, costos, ingresos netos, margen bruto y rendimiento de indiferencia según tres manejos diferenciales (combinaciones de dosis de N y densidad objetivo) para tres escenarios de precio. Manejo típico: de mayor frecuencia a nivel zonal; recomendado: máxima tasa de retorno de la inversión; y óptimo económico: máximo margen bruto.**

Precio ton maíz U\$S	Relación precios	Manejo	Dosis N kg ha <sup>-1</sup>	Densidad miles pl ha <sup>-1</sup>	Rendimiento esperado kg ha <sup>-1</sup>	Costos	Ingresos netos	Margen bruto	Rendimiento indiferencia kg ha <sup>-1</sup>
130	9.3	Típico	160	75	13 376	\$ 1164	\$ 1278	\$ 113	12 190
		Recomendado	220	88	14 594	\$ 1251	\$ 1394	\$ 143	13 095
		Óptimo económico	220	95	14 814	\$ 1269	\$ 1415	\$ 146	13 288
160	7.5	Típico	160	75	13 376	\$ 1164	\$ 1572	\$ 408	9905
		Recomendado	230	92	14 805	\$ 1270	\$ 1740	\$ 470	10 803
		Óptimo económico	240	104	15 209	\$ 1310	\$ 1788	\$ 478	11 146
190	6.4	Típico	160	75	13 376	\$ 1164	\$ 1867	\$ 703	8341
		Recomendado	240	98	15 057	\$ 1294	\$ 2102	\$ 807	9273
		Óptimo económico	240	107	15 270	\$ 1318	\$ 2132	\$ 813	9442

y la fertilización nitrogenada en ambientes de elevada productividad con influencia de napa. La correcta elección de densidad de siembra es de suma importancia ya que el costo de semilla es uno de los principales que acarrea el productor cuando realiza maíz. La misma depende del N disponible, y por lo tanto para lograr planteos exitosos, en necesario contemplar ambas variables.

El aumento de productividad logrado contribuiría además con otros aspectos positivos relevantes al sistema no cuantificados, pero si observados, como ser el mayor aporte de carbono y de mejor calidad, mejor competencia contra las malezas, un mayor consumo de agua y mayores eficiencias en el uso de los recursos como el N y el agua.

### Agradecimientos

A todos los que participan en el funcionamiento de la Chacra Justiniano Posse: Agroservicios S.R.L, La Comarca S.R.L., Cooperativa Agropecuaria Unión de Justiniano Posse Ltda., Cooperativa Agrícola Ganadera de Justiniano Posse Ltda., Las Tres Marías SRL, Pelagagge S.A., Rosso Agro S.R.L., Simplón SRL, Norberto Ballarío S.A., Pablo Panatti, Juan Giannasi, Jorge Mazzieri, José Mazza, Julio Pérez, Daniel Cotorás, y Javier Orazi.

### Bibliografía

Bertram, N., y S. Chiachera. 2014. Ascenso de napas en la región pampeana: ¿Consecuencia de los cambios en el uso de la tierra? INTA EEA Marcos Juárez Título.

Capristo, P.R., R.H. Rizzalli, y F.H. Andrade. 2007. Ecophysiological Yield Components of Maize Hybrids with Contrasting Maturity. *Agron. J.* 99-1111.

Cisneros, J., H.A. Gil, J.D. De Prada, A. Degioanni, G.A. Cantero, O. Giayetto, J.P. Ioele, O.A. Madoery, A. Masino, y J. Rosa. 2014. Estado actual, pronósticos y propuestas de control de inundaciones en el centro-este de la provincia de Córdoba. Río Cuarto, Argentina.

Cisneros, J., M. Scilingo, O. Giayetto, F. Morla, y E.G. Jobbágy. 2013. Uso del modelo de simulación AquaCrop-FAO para estimar el aporte subterráneo de agua al cultivo de soja. En: Actas del XXIV Congreso Nacional del Agua. San Juan, Argentina. pp. 1-10.

Dardanelli, J., y D.J. Collino. 2002. Water table contribution to alfalfa water use in different environments of the Argentine Pampas, *Agriscientia*, 19:11-18.

Di Rienzo J.A., F. Casanoves F, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, y C.W. Robledo. 2017. InfoStat versión 2017. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

Echeverría, H.E., H.R. Sainz Rozas y P.A. Barbieri. 2015. Maíz y Sorgo. En: Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos, Eds.: Echeverría, H. E.; García, F. Capítulo 15. 904 p.

Hörbe, T.A.N., T.J.C. Amado, A.D.O. Ferreira, y P.J. Alba. 2013. Optimization of corn plant population according to management zones in Southern Brazil. *Precision Agriculture*, 14(4):450-465.

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 1986. Carta de suelos de la República Argentina, hoja 3363-22 Laborde.

Maddoni, G.A., R.A. Ruiz, P. Villariño, e I. García de Salamone. 2003. Fertilización en los cultivos para grano. En: Producción de granos: bases funcionales para su manejo, Eds.: Satorre et al. Capítulo 19. 783 p.

Nosetto, M.D., E.G. Jobbágy, R.B. Jackson, y G.A. Sznajder. 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crop Research* 113:138-148.

Uhart, S.A., y F.H. Andrade. 1995. Nitrogen deficiency in maize. I. Effects on crop growth development dry matter partitioning and kernel set. *Crop Science* 35:1376-13835. ✨

## Cursos y Simposios

Esta sección presenta eventos futuros en el ámbito regional e internacional que pueden ser de interés de los lectores

### 1. XIX Conferencia Internacional sobre Palma de Aceite

**Organiza** : FEDEPALMA-CENIPALMA  
**Lugar** : Cartagena de Indias, Colombia  
**Fecha** : 26-28 Septiembre, 2018  
**Información** : <http://web.fedepalma.org/xviii-conferencia/es/la-conferencia>

### 2. XLIII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo

**Organiza** : SMCS  
**Lugar** : Saltillo, Coahuila, México  
**Fecha** : 1-5 Octubre, 2018  
**Información** : <http://smcsmx.org/index.php>

### 3. ASA-CSSA-SSSA Meetings: "Enhancing Productivity in a Changing Climate"

**Organiza** : ASA-CSSA-SSSA  
**Lugar** : Baltimore, Maryland, EE.UU  
**Fecha** : 4-7 Noviembre, 2018  
**Información** : <http://www.acsmeetings.org>

### 4. Segundo Congreso Mundial de Alfalfa

**Organiza** : Ministerio de Agroindustria, Argentina  
**Lugar** : Córdoba, Argentina  
**Fecha** : 11-14 Noviembre, 2018  
**Información** : <https://www.worldalfalfacongress.org>

### 5. XVI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo

**Organiza** : SECS  
**Lugar** : Manta, Ecuador  
**Fecha** : 14-16 Noviembre, 2018  
**Información** : <http://www.secsuelo.org/contacto@secsuelo.org>

### 6. Conferencia Internacional de TIC para la Adaptación de la Agricultura al Cambio Climático AACC-2018

**Organiza** : AACC  
**Lugar** : Cali, Colombia  
**Fecha** : 21-23 Noviembre, 2018  
**Información** : <http://www.ricclisa.org/aacc18/>

### 7. Conferencia y Exhibición InfoAg International

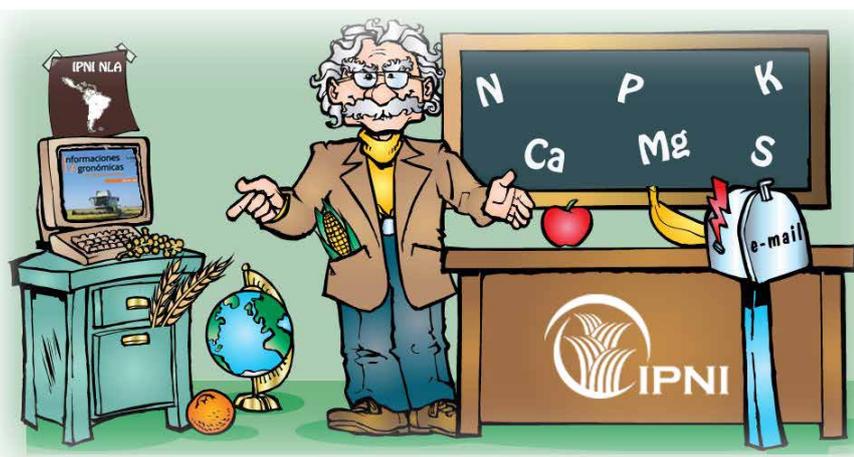
**Organiza** : New Ag International e IPNI  
**Lugar** : Dublín, Irlanda  
**Fecha** : 27-29 Marzo, 2019  
**Información** : <https://lifesciences.knect365.com/infoag-international-conference-exhibition/>

### 8. Optimizando la Productividad y el Lucro en Sistemas de Producción Soja - Maíz

**Organiza** : IPNI Brasil, IPNI Cono Sur y Agronómico de Paraguay  
**Lugar** : Iguazu, Paraná  
**Fecha** : 24-26 Abril, 2019  
**Información** : <https://conference.ipni.net/conference/sojamilho2019>

### 9. XXII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo

**Organiza** : SUCS-SLCS  
**Lugar** : Montevideo, Uruguay  
**Fecha** : 7-11 Octubre, 2019  
**Información** : <http://clacs.org>



## Publicaciones Disponibles IPNI-Norte de Latinoamérica

Título de la Publicación	Costo (U\$S)
<p><b>Guía de Campo, Síntomas de Deficiencias Nutricionales y otros Desórdenes Fisiológicos del Cultivo de Banano.</b> Guía de Campo para técnicos y agricultores que permite identificar en el campo los síntomas de deficiencia nutricional, conocer algo de sus causas y como éstas podrían prevenirse o remediarse.</p>	10.00
<p><b>Manual de Arroz. Desórdenes Nutricionales y Manejo de Nutrientes:</b> Esta publicación contiene información que permite desarrollar estrategias de manejo nutricional y recomendaciones de fertilización del arroz cultivado en regiones tropicales y subtropicales. <b>Guía Práctica para el Manejo de Nutrientes en Arroz:</b> Contiene una discusión concisa y muy práctica de las estrategias de manejo nutricional y recomendaciones de fertilización del arroz cultivado en regiones tropicales y subtropicales. Excelente herramienta de apoyo en el contacto diario con los agricultores.</p>	45.00
<p><b>Palma de Aceite. Manejo para Rendimientos Altos y Sostenidos:</b> La palma de aceite es uno de los cultivos con mayor expectativa de crecimiento a nivel mundial, existe una gran demanda entre los palmicultores y agrónomos por conocimientos y publicaciones sobre su manejo adecuado.</p>	45.00
<p><b>Guía de Campo, Serie en Palma Aceitera, Volumen 1:</b> Vivero. Guía de campo preparada específicamente para uso práctico en el manejo diario de la palma aceitera. El volumen 1 cubre el manejo del vivero para producir plántas de calidad que deben estar disponibles para la siembra en el campo en el momento requerido.</p> <p><b>Guía de Campo, Serie en Palma Aceitera, Volumen 2:</b> Fase Inmadura. Guía de campo preparada específicamente para uso práctico en el manejo diario de la palma aceitera. El volumen 2 cubre el manejo de la fase inmadura de la plantación para lograr una población uniforme de palmas productivas en cada bloque del campo.</p> <p><b>Guía de Campo, Serie en Palma Aceitera, Volumen 3:</b> Fase Madura. Guía de campo preparada específicamente para uso práctico en el manejo diario de la palma aceitera. El volumen 3 cubre el manejo de la fase madura de la plantación para lograr rendimientos sostenidos de racimos de fruta fresca a través de toda la etapa productiva del cultivo.</p>	45.00
<p><b>4R de la Nutrición de Plantas:</b> El concepto de los 4R, los 4 Requisitos, del "<b>MANEJO RESPONSABLE DE NUTRIENTES</b>" es un enfoque nuevo e innovador para las mejores prácticas de manejo de los fertilizantes adoptado por la industria mundial de fertilizantes. Este enfoque considera dimensiones económicas, sociales y ambientales del manejo de nutrientes y es esencial para la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. El concepto es simple—aplicar la fuente correcta de nutrientes, en la dosis, el momento y el lugar correctos—pero la implementación usa el conocimiento en forma intensiva y es específica para cada sitio.</p>	30.00
<p><b>Manual Internacional de Fertilidad de Suelos:</b> Publicación didáctica sobre uso y manejo de suelos y fertilizantes con datos y ejemplos de diferentes partes del mundo</p>	15.00
<p><b>Uso Eficiente de Nutrientes:</b> Esta publicación resume el estado del conocimiento con respecto a la eficiencia de uso de nutrientes en las Américas y discute el contexto contemporáneo dentro del cual se deben manejar los nutrientes.</p>	15.00
<p><b>Nutrición y Fertilización del Mango:</b> Esta publicación ofrece información básica para el manejo de la nutrición y fertilización del mango tomando en cuenta las particulares características de desarrollo de este cultivo en el trópico.</p>	15.00
<p><b>Vea el catálogo completo de publicaciones del IPNI en <a href="http://nla.ipni.net">http://nla.ipni.net</a></b></p>	