

AGRICULTURA DE PRECISIÓN: DOSIS VARIABLE DE FÓSFORO EN SOJA (*Glycine max* (L.) Merr.)

NAHUEL RAÚL PERALTA^{1*}; MARTIN TRUEBA²; NICOLÁS
WYNGAARD^{2,3}; MARIANO CÓRDOBA^{3,4}; LEONARDO
SALLESES⁵

Recibido: 10/06/2020

Recibido con revisiones: 02/05/2021

Aceptado: 03/05/2021

RESUMEN

La agricultura de precisión (AP) permite delimitar zonas de manejo (ZM) que expresan diferente potencial de rendimiento. Los objetivos de esta investigación fueron: (I) Determinar la interacción entre las ZM y la fertilización con P sobre el rendimiento del cultivo de soja y (II) Cuantificar la eficiencia de uso de fósforo (EUP) entre zonas de manejo. La experiencia se realizó en dos lotes de aptitud agrícola en el sudeste bonaerense, en el partido de Benito Juárez. (37° 26'53,23"S; 59° 35'45,28"O). Las ZM se delimitaron utilizando distintas variables, elevación del terreno, índice topográfico de humedad (TWI) y la profundidad de suelo. Para caracterizar cada zona de manejo se realizó un muestreo de suelo a una profundidad de 20 cm y se determinó el P extractable. Los datos de rendimiento de soja fueron recolectados con un monitor de rendimiento. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos aleatorizados con 4 repeticiones por ZM y se evaluaron 5 dosis de fósforo (0, 10, 15, 20, 25 kg P ha⁻¹). En este trabajo no se encontró interacción entre zonas de manejo y fertilización fosforada, pero se determinó un efecto significativo del agregado de P ($p < 0,05$) con una respuesta promedio de 392 kg ha⁻¹. Por otro lado, se encontraron diferencias significativas en la eficiencia de uso de P del fertilizante entre zonas de manejo ($p < 0,05$). En el lote 4 la mayor EUP fue en la ZM de alta productividad (26,4 kg grano kgP⁻¹). Mientras que en el lote 6, la mayor EUP fue en la ZM de media productividad (26,8 kg grano kgP⁻¹). En suelos con bajos niveles de P-Bray y similares valores entre ZM sugieren una aplicación de dosis de P elevadas y uniformes en lugar de aplicar dosis variables de P, la cual es conveniente en condiciones de ZM con mayores diferencias entre P-Bray

Palabras clave: Zonas de manejo, profundidad de suelo, variabilidad espacial, Sudeste Bonaerense.

PRECISION AGRICULTURE: VARIABLE PHOSPHORUS RATE IN SOYBEAN (*Glycine max* (L.) Merrill.)

¹ BAYER Crop Science1

² UNMdP

³ CONICET

⁴ UNC

⁵ INTA Balcarce

* Autor de contacto: nperalta21@gmail.com

ABSTRACT

Precision agriculture (AP) allows differentiating management sites (ZM) that express contrasting grain yield potential. The aims of this study were to: i) evaluate the interaction between ZM and phosphorus (P) fertilization over soybean yield, and ii) quantify the P use efficiency (EUP) in the different ZM. The experience was carried out in two agricultural fields (Site 4 and Site 6) from Benito Juárez. (37° 26'53,23"S; 59° 35'45,28"O). The ZM were delimited based on the land elevation, topographic index (TWI) and soil depth. The extractable P content (P-Bray) was determined at each ZM after soil sampling. At each ZM, trials with a randomized complete block design (four replications) were performed to evaluate five different P rates (0, 10, 15, 20, 25 kg P ha⁻¹). No interaction between ZM and P fertilization over grain yield was observed. However, the EUP was affected by ZM. The greatest EUP was observed in zones with medium or high productive potential with lower values of P-Bray in the soil.

Keywords: Management zones, soil depth, spatial variability, Southeastern Buenos Aires.

INTRODUCCIÓN

La carencia de fósforo (P) es una de las principales limitantes para la productividad del cultivo de soja. Una deficiencia de P puede provocar mermas de rendimiento, principalmente por una disminución en la nodulación, fijación de N y área foliar, afectando negativamente el número de granos de las plantas (Calviño y Redolatti; 2004; Antonangelo *et al.*, 2019). La mayoría de los suelos de la Pampa Húmeda presentan deficiencia de P, limitación que se intensifica hacia el este y al sur de la región Pampeana (Rubio *et al.*, 2008; Sainz Rozas, 2019).

Se ha determinado que la respuesta del cultivo de soja a la fertilización fosforada aumenta cuando el nivel de P extractable en la capa superficial (0-20 cm) de los suelos disminuye, estableciéndose valores umbral que oscilan entre 10 y 16 mg kg⁻¹ de P Bray a 0-20 cm (Echeverría *et al.*, 2002; Sucunza *et al.*, 2018). En la mayor parte de los suelos de la región pampeana los niveles de P extractable son inferiores o iguales a 15 mg P kg⁻¹ (Sainz Rozas, 2019). Estos bajos

niveles de P extractable resultan limitantes para la producción del cultivo de soja en la región (Echeverría *et al.*, 2002; Calviño & Redolatti; 2004; Sucunza *et al.*, 2018).

Cuando se considera la variabilidad espacial de la disponibilidad de P para los cultivos, el manejo de este nutriente se complejiza significativamente (Bermúdez & Mallarino, 2007; Simón *et al.*, 2013). Esto se debe a que las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo pueden producir variabilidad tanto en la cantidad total de P en el suelo, la fracción de P disponible para el cultivo, rendimiento como exportación de P por parte de los cultivos (Simón *et al.*, 2013; Haixiao *et al.*, 2019).

La variabilidad en las propiedades del suelo puede ocurrir en varias escalas, desde centímetros a escalas regionales, pero es de especial interés para el manejo variable de P, la que ocurre a nivel intra-lote. Particularmente, la variabilidad del nivel de P en el suelo puede ser muy alta aún dentro de campos que parecen ser uniformes en otras propiedades del suelo (Mallarino & Wittry, 2004) y tiende a ser todavía más alta



en lotes con varios años de agricultura y ganadería, sobre todo con extensa historia de fertilización y aplicación de enmiendas (Mallarino & Wittry, 2004). Por lo tanto, con muy pocas excepciones, los lotes de producción presentan áreas donde los cultivos requieren la aplicación de P y áreas donde no se requiere fertilizar o el requerimiento es significativamente menor.

Una estrategia de manejo para contemplar la variabilidad espacial en la disponibilidad, requerimientos y eficiencia de uso de P es la agricultura de precisión (AP). Esta herramienta junto con la “ciencia de datos” permiten generar zonas de manejo (ZM) en base a las principales variables que afectan el rendimiento en grano, tales como topografía y profundidad de suelo (Peralta *et al.*, 2015, Córdoba *et al.*, 2016). La AP está integrada por tecnologías que permiten la aplicación de insumos agrícolas, tales como fertilizantes, en forma variable dentro de un lote y de acuerdo a los requerimientos según al potencial productivo de varios sectores homogéneos y predefinidos (Peralta *et al.*, 2013). El área de mayor desarrollo dentro de la AP es el manejo de nutrientes sitio-específico (MNSE), también llamado “tecnología de dosis variables (TDV).

La TDV corresponde a la aplicación variable de dosis de fertilizantes de acuerdo el nivel de fertilidad de cada sector de manejo homogéneo dentro del lote. Esto significa que no se trabaja, con una sola dosis de fertilizante por lote, sino con tantas dosis como áreas significativamente homo-

géneas existan en el mismo (Peralta *et al.*, 2013a,b; Unamunzaga, 2014).

Los suelos agrícolas del sudeste bonaerense presentan variaciones a nivel de lote en: textura, contenido de materia orgánica, profundidad efectiva, altimetría y disponibilidad de agua para los cultivos (Peralta *et al.*, 2013c; Alesso *et al.*, 2012; Pagani, 2019), generando variabilidad espacial en los niveles de P y así, posiblemente, en la respuesta a la fertilización fosforada en el cultivo de soja (Bermúdez y Mallarino, 2007). Dadas estas condiciones, es esperable que el efecto combinado de las características del suelo, del terreno, y las condiciones ambientales generen interacciones complejas en las relaciones suelo-planta y produzcan variación espacial en el rendimiento y en la respuesta al agregado de P en el cultivo de soja. Por lo tanto, es necesario estudiar la respuesta variable de P en el cultivo de soja entre diferentes zonas de manejo en suelo predominantes de la región bajo estudio (Argiudoles y Paleudoles). Los objetivos de esta investigación fueron: (I) determinar la interacción entre las zonas de manejo y la fertilización con P en el cultivo de soja y (II) cuantificar la eficiencia de uso de fósforo (EUP) en las zonas de manejo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

La experiencia se realizó durante la campaña agrícola 2015-2016 (**Figura 1**) en dos lotes con aptitud agrícola en el sudeste bonaerense (identificados como lote 4- de



42 has- y lote 6- de 53 has), cercanos a la localidad de María Ignacia Vela, en el partido de Benito Juárez. (37°26'53,23"S; 59°35'45,28"O). Se seleccionaron estos lotes porque están constituidos por los principales grupos de suelo de la región (Argiudoles y Paleudoles) y porque presentaron amplia variación espacial en la profundidad de suelo y atributos topográficos. Se sembró la variedad de soja Don Mario 2200, ciclo II corto y de hábito de crecimiento indeterminado, con sistema de labranza cero los días 11 y 12 de noviembre para los lotes

6 y 4, respectivamente. Se utilizó una sembradora neumática para grano grueso Dolbi AX 4100. La distancia entre surcos fue de 35 cm y la densidad de siembra fue 13 semillas por metro lineal, equivalente a 370000 semillas por hectárea. El manejo de los ensayos fue similar al empleado en lotes de producción de la zona.

Se mantuvo libre de malezas a lo largo del ciclo del cultivo y no requirió control químico de insectos ni enfermedades fúngicas

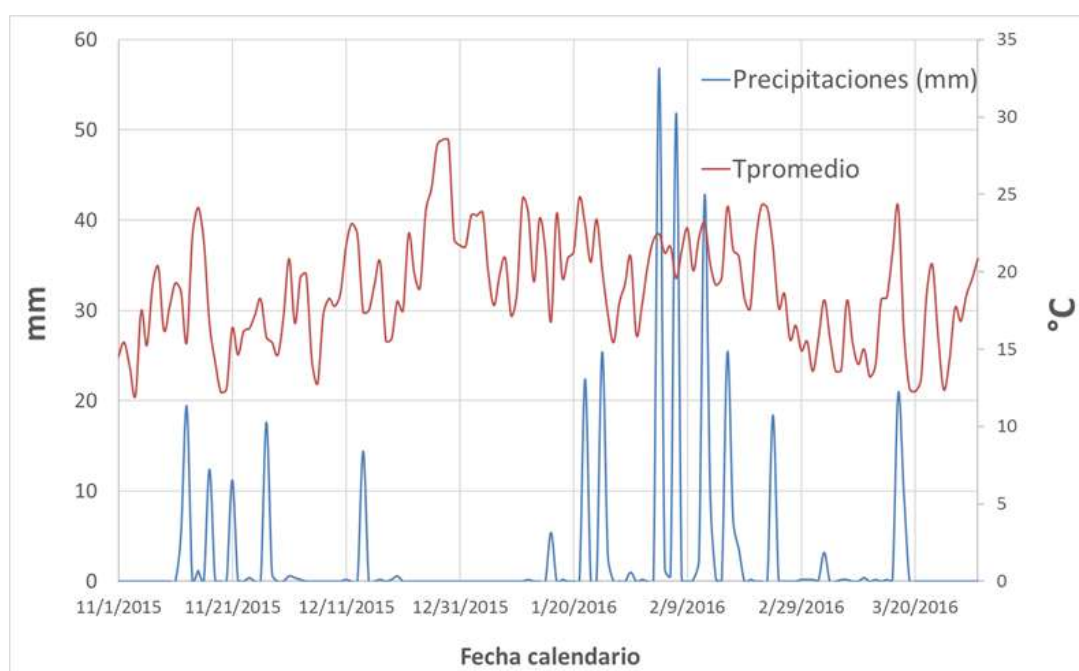


Figura 1. Precipitaciones y temperatura promedio mensual durante la estación de crecimiento de la soja.

Figure 1. Monthly average rainfall and temperature during soy growing season.

Medición de las variables para generar zonas de manejo

La profundidad de suelo se midió con una varilla metálica de 1.5 mts y el muestreo fue realizado en una grilla de 45m, georreferenciando cada punto con un GPS

(Juno ST; Trimble Navigation Limited, USA). El mapa de relieve se realizó utilizando el modelo digital de elevación (MDE) generado por la NASA (SRTM 30m Elevation Database) (Figura 2). El Índice topográfico de humedad (TWI) es un atributo secundario

del terreno calculado a partir de atributos primarios, en este caso a partir del grado de la pendiente y la dirección y acumulación de flujo (**Figura 2**).

$$TWI = \ln (A_s / \tan \beta)$$

donde:

A_s es el área de acumulación de flujo medida en metros cuadrados (m^2).

β es la pendiente medida en porcentaje (%).

El TWI ha sido usado para predecir características y variables del suelo tales como: capacidad de agua disponible, clases de drenaje del suelo y curvas de retención de agua. Valores altos del TWI indican aumento de la probabilidad de encontrar condiciones de saturación, usualmente en partes cóncavas y bajas de las cuencas.

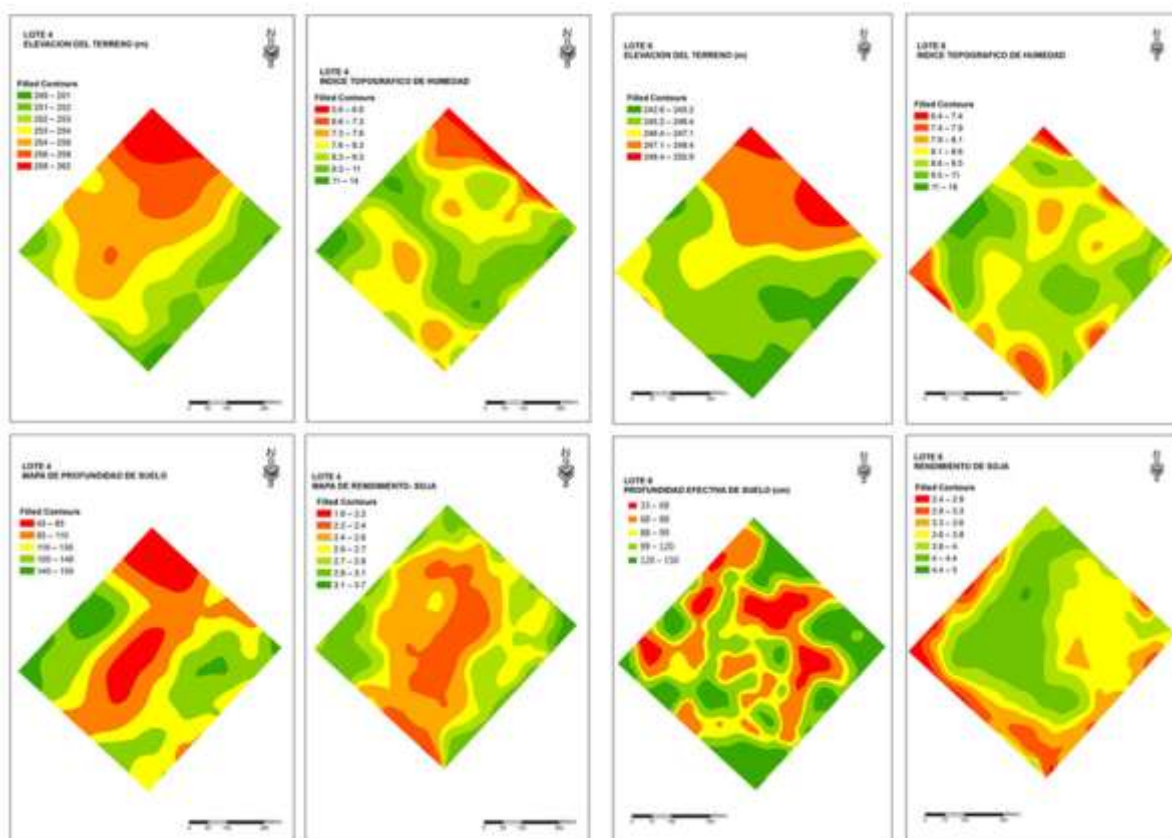


Figura 2. Mapas de contorno de las propiedades de sitio: Elevación del terreno (m), índice topográfico de humedad, Profundidad de suelo y de rendimiento en grano ($Mg\ ha^{-1}$) de los cultivos para el lote 4 y 6.

Figure 2. Site properties outline maps: land elevation (m), topographic moisture index, soil depth, and grain yield ($Mg\ ha^{-1}$) for site 4 and 6.

Rendimiento en grano y Eficiencia de Uso del P (EUP) aplicado como fertilizante

Los datos de rendimiento en grano fueron medidos y colectados utilizando un monitor de rendimiento comercial acoplado a una cosechadora Claas Tucano 470, equipada

con un DGPS. Se cosecharon los 28 surcos centrales de cada parcela. Los datos de rendimiento de soja fueron registrados a cada segundo, corregidos a 13,5% de humedad del grano y se eliminaron los errores de la base de datos siguiendo las pautas descritas por Córdoba *et al.*, 2016. Los puntos erróneos del monitor de rendimiento fueron eliminados utilizando la herramienta Geostatistical Analyst (ArcGis 10.1), siguiendo la metodología propuesta por Peralta *et al.*, 2013. La EUP se calculó como la relación entre el rendimiento en grano (kg ha^{-1}) con fertilizante menos rendimiento del cultivo sin fertilizantes)/kg de fertilizante

Variabilidad espacial de la elevación, profundidad del suelo y rendimiento de grano de soja

La estructura de variabilidad y correlación espacial de la elevación, la profundidad del suelo y el rendimiento de grano de soja dentro del lote fue cuantificada con semivariogramas (Isaaks & Srivastava, 1989). Posteriormente, se procedió a la interpolación de todas las capas de datos con el procedimiento *Kriging Ordinario* a una grilla de 10*10 mts (Peralta *et al.*, 2013).

Delimitación de zonas de manejo

La delimitación de zonas de manejo se realizó mediante el software Management Zone Analyst (Fridgen *et al.*, 2004). Este software realiza la división de ambientes mediante un análisis cluster (fuzzy K-means)

(Córdoba *et al.*, 2013; Peralta *et al.*, 2015). El análisis cluster (conglomerados) fuzzy-K means, es un algoritmo difundido específicamente para la delimitación de ambientes, el cual consiste en la identificación de grupos (Córdoba *et al.*, 2013). El fuzzy K-means puede asignar un caso a más de un cluster, con diferentes grados de pertenencia. Como primer paso, fuzzy K-means calcula los centros de los clusters difusos para el número elegido de clusters. Entonces calcula el grado de pertenencia de cada caso, respecto a cada cluster, y para cada variable de entrada. En el fuzzy K-means, los grupos o conglomerados se arman de manera tal que las diferencias dentro de cada grupo son minimizadas y se maximizan las diferencias entre grupos, permitiendo maximizar la varianza intergrupala y minimizando la varianza intragrupal (Córdoba *et al.*, 2013). Para determinar el número de ZM dentro del lote, se utilizaron dos índices de desempeño; la entropía normalizada de la clasificación (Normalized Classification Entropy, NCE) y el índice de rendimiento difuso (Fuzziness Performance Index, FPI) (**Figura 3**). El número seleccionado de zonas se determinó cuando ambos, NCE y FPI, se redujeron al mínimo, lo que representa el menor grado de solapamiento (FPI) o la mayor cantidad de organización (NCE) creada por la partición difusa de la matriz de datos original (Fridgen *et al.*, 2004). Es decir que, el número óptimo de ZM es aquel que se obtiene cuando los índices de desempeño alcanzan su mínimo



valor. Fridgen *et al.*, (2004) indican que la concordancia de los dos índices es un indicador de la bondad de la clasificación (**Figura 3**). Este software permite la división de ambientes mediante un análisis cluster (fuzzy K-means) (Córdoba *et al.*, 2013).

Las variables de entrada para generar las ZM fueron: topografía del terreno (elevación del terreno y TWI) y mapas de profundidad efectiva del suelo (Peralta *et al.*, 2015).

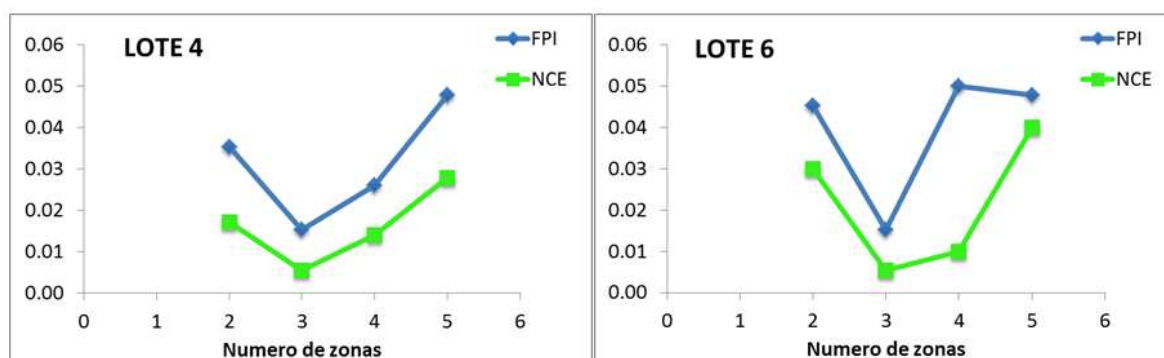


Figura 3. Índice de desempeño del grado de ambigüedad (FPI) y entropía de clasificación normalizada (NCE) para dos sitios experimentales.

Figure 3. Fuzziness performance index (FPI) and normalized classification entropy (NCE) for two experimental sites

Muestreos y análisis de suelo

Se definieron 3 zonas de manejo basadas en el análisis clúster de las variables topográficas y con profundidad de suelo (**Figura 3**). Cada una de ellas con distinto índice de productividad: bajo, medio y alto (**Figura 4**). Se tomaron 12 muestras de suelo por lote, 4 por cada zona de manejo en puntos seleccionados previamente e identificados a campo por el uso de un GPS Juno (Trimble Navigation Limited, USA). Cada una de las muestras fue compuesta por un total de 12 submuestras a una profundidad de 0-20 cm.

Las muestras se secaron en estufa a 30°C con circulación forzada de aire hasta peso constante. Una vez secas se molieron y tamizaron por una malla de 2 mm y de 0,5

mm. Posteriormente se determinó el P extractable según Bray & Kurtz (1945).

Diseño experimental y dosis de P

Se evaluaron 5 dosis de fósforo (0, 10, 15, 20 y 25 kg P ha⁻¹) aplicadas en forma de fosfato diamónico (20% de P) al momento de la siembra. El diseño experimental fue en bloques completos aleatorizados con 4 repeticiones por cada zona de manejo. El ancho de la franja fue de 13,3 m (representando dos pasadas de trabajo de la sembradora) y el largo de 50 metros. Se cosecharon los surcos centrales de cada parcela y se excluyeron los bordes de cada una de las parcelas, siguiendo la metodología reportada por Peralta *et al.* (2015a) (**Figura 4**).

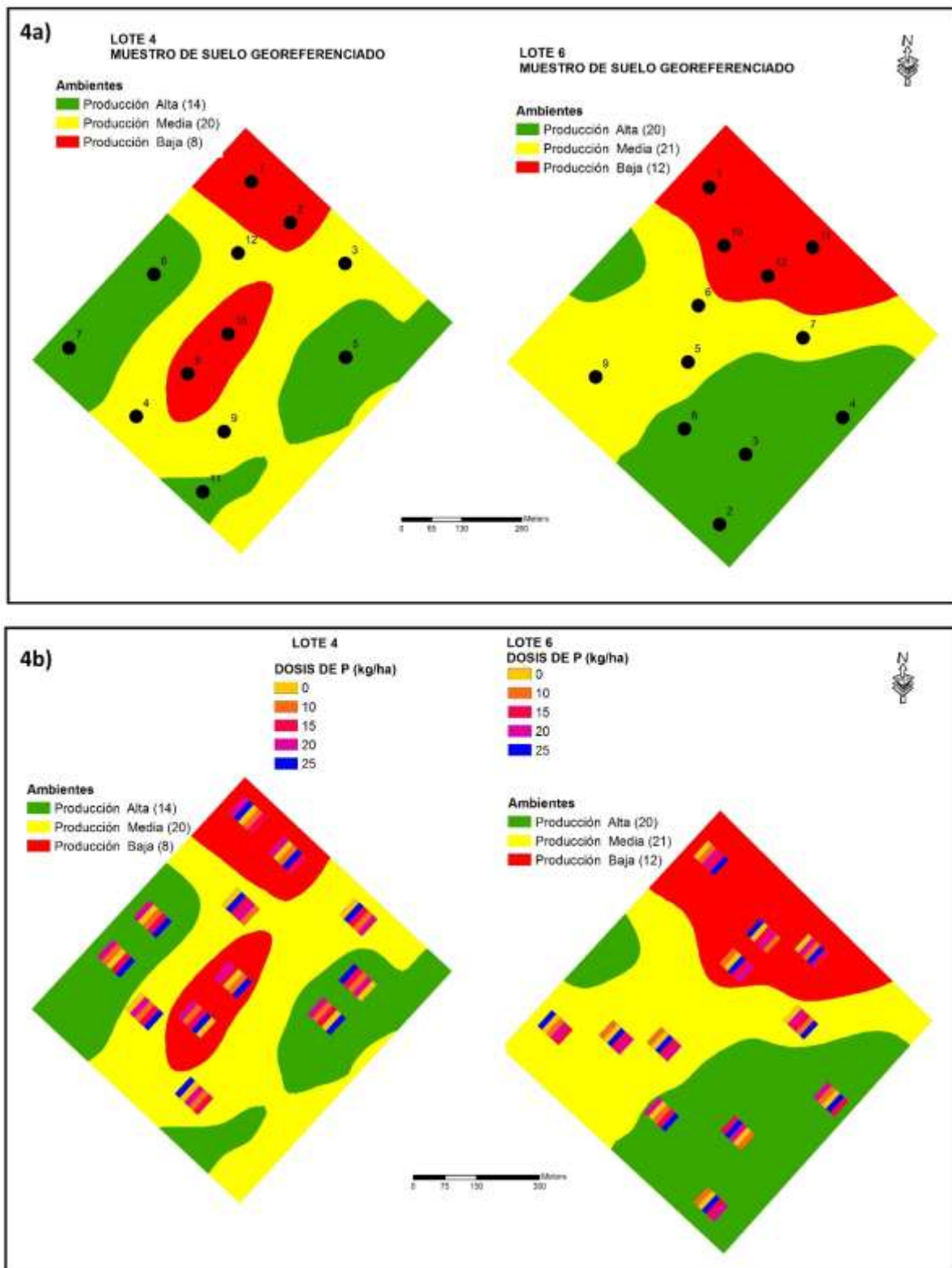


Figura 4. a) Localización de los puntos de muestreo. b) Diseño de experimento en bloques sobre mapas de índice productividad. Cada bloque incluye cinco tratamientos con diferentes dosis de fósforo.

Figure 4. a) Location of the sampling points. b) Experimental design at block on productivity index maps. At block includes five different phosphorus fertilization treatments.



Evaluación de tratamientos

Dentro de cada ZM se seleccionaron todos los bloques clasificados sin ambigüedad dentro de la misma (todas las parcelas pertenecen al mismo cluster). Con el objetivo de comparar los tratamientos de fertilización en cuanto al rendimiento de grano y considerando la ZM en la que fueron aplicados, se ajustó para cada lote un modelo lineal mixtos (MLM) con varianzas homogéneas y otro con varianzas heterogéneas entre ZM (Eq. 2).

$$y_{ijk} = \mu + T_i + Z_j + B(Z)_{k(j)} + T Z_{(ij)} + \varepsilon_{ijk} \quad (2)$$

donde y_{ijk} representa rendimiento observado en la dosis de fertilizante i , zona de manejo j , bloque k ; μ representa la media general de la respuesta; T_i es el efecto (fijo) de la dosis de fertilizante con $i=1, \dots, t$; Z es el efecto (fijo) de la zona de manejo con $j=1, \dots, Z$; $B(Z)_{k(j)}$ es el efecto (aleatorio) del bloque dentro de la zona de manejo con $k=1, \dots, b$; $T Z_{(ij)}$ es el efecto de la interacción entre la dosis de fertilizante i y la zona de manejo k y ε_{ijk} es el término de error asociado a la observación y_{ijk} . La suposición sobre las componentes aleatorias es que $B(Z)_{k(j)} \sim N(0; \sigma_k^2)$, mientras para $\varepsilon_{ijk} \sim N(0; \sigma_i^2)$, donde σ_i^2 es la varianza dentro de repeticiones de un mismo tratamiento dentro de la zona de manejo i .

Para comparar las diferencias en los promedios de elevación, índice topográfico

de humedad (TWI), profundidad de suelo (PS), fosforo extractable (P-Bray) y rendimiento en grano (RG) de soja dentro de cada zona de manejo (ZM) se utilizó un ANOVA de modelo mixto con la función `gl` del paquete "nlme" (Pinheiro, Bates, DebRoy, Sarkar, & R Core Team, 2014).

Para realizar el análisis de regresión entre rendimiento en grano de silo y variables de sitio (elevación y profundidad de suelo) se utilizó la función "lm" del software R (R Core Team, 2014)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento de las diferentes variables por zona de manejo

Hubo diferencias estadísticamente significativas para el rendimiento de soja a favor de la ZM de alta productividad tanto en el lote 4 ($p < 0,05$, **Tabla 1**) como en el lote 6. En el lote 4 se encontraron diferencias en la profundidad de suelo para los tres ambientes (**Tabla 1**), mientras que en el lote 6 la profundidad de suelo del ambiente de alto potencial contrastó con la de los ambientes de bajo y medio potencial, no siendo así entre estos dos últimos. En ambos lotes, la profundidad del suelo presentó relación positiva con el rendimiento en grano (**Figura 5**) y estuvo asociado a la elevación del terreno. Las zonas del lote con mayor elevación del terreno y pendiente contienen carbonato de calcio consolidado (tosca) en superficie, reduciendo la capacidad de almacenaje de agua del suelo, afectando negativamente el crecimiento y



desarrollo de los cultivos (Calviño *et al.*, 2003; Peralta *et al.*, 2013c). La variable profundidad de suelo está directamente asociada a la capacidad de almacenamiento de agua en el perfil del suelo (Peralta *et al.*, 2015a). Cuanto mayor es su profundidad, mayor será la disponibilidad de agua para el cultivo. Calviño *et al.* (2003) informaron que

el rendimiento decae a medida que disminuye la profundidad del suelo y la elevación del terreno aumenta, determinando el patrón espacial del rendimiento de los cultivos.

Tabla 1. Promedio de elevación, índice topográfico de humedad (TWI), profundidad de suelo (PS), fósforo extractable (P-Bray) y rendimiento en grano (RG) de soja dentro de cada zona de manejo (ZM).

Table 1. Elevation, topographic moisture index (TWI), elevation, depth soil (PS), P-Bray and yield means (RG) within management zones (MZ).

Lote	ZM	Elevación (m)	TWI	PS (cm)	P-Bray (mg kg ⁻¹)	RG (Mg ha ⁻¹)
4	Baja	257,4 c	7,6 a	70,3 a	5,7	2752 a
	Media	254,2 b	8,4 b	113,7 b	5,5	2762 a
	Alta	253,0 a	9,5 c	141,1 c	6,5	2936 b
6	Baja	248,3 c	8,4 a	90,9 a	11,6 b	3324 b
	Media	246,5 b	8,8 b	97,1 a	7,7 a	3359 b
	Alta	245,0 a	9,3 c	108,1 b	8,0 a	3436 a

Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

Los sitios de mayor elevación del terreno para cada uno de los lotes coinciden con aquellos de menor profundidad de suelo (**Figura 5**). Tanto para el lote 4 como para el lote 6 existen diferencias significativas en la elevación, siendo menor para ambientes de alto potencial, media para los de medio potencial y mayor para los de bajo potencial (**Tabla 1**). La potencialidad de producción del lote está estrechamente relacionada a la disponibilidad de agua para el cultivo, y puede definirse a partir del cálculo del TWI. Valores más altos de este índice significa mayor acumulación de agua. Puede observarse que existen diferencias de TWI entre las tres zonas de manejo para ambos lotes (**Tabla 1**). La curvatura del terreno

determina la concentración o dispersión del flujo de agua superficial (Kravchenko & Bullock, 2000). Se ha documentado que la correlación negativa de la curvatura plana del terreno con el rendimiento es atribuible a que las curvaturas cóncavas (valores negativos) concentran el agua superficial, lo cual incrementa la infiltración, mientras que las curvaturas convexas dispersan el flujo de agua, reducen la infiltración, disminuyendo la cantidad de agua disponible para el cultivo, afectando el crecimiento y desarrollo (Kravchenko & Bullock, 2000). En lo que respecta a la correlación positiva entre el flujo de acumulación y el rendimiento, se supone que las áreas con valores mayores de acumulación están asociadas a lugares



con baja pendiente donde el agua se puede depositar y estar disponible para el cultivo (Peralta *et al.*, 2013c).

Los valores de P-Bray del lote 4 y 6 fueron 5,93 mg kg⁻¹ y 9,15 mg kg⁻¹, respectivamente (**Tabla 1**). Estos resultados coinciden con los descriptos para la región pampeana por Sainz Rozas *et al.* (2019). El manejo de las rotaciones de cultivos y la fertilización de los lotes fue similar a lo largo del tiempo, por este motivo se esperaba que los niveles de P fueran menos dispares. Es posible que el lote 4 haya sufrido pérdidas de P por escurrimiento superficial debido a sus características topográficas, en sentido norte/sur.

Los ambientes de alto potencial para ambos lotes alcanzaron, a lo largo del tiempo, mayores rendimientos para los distintos cultivos. Se esperaba que los mayores rendimientos provocaran una

mayor extracción de fósforo y que dichas zonas tuvieran menores niveles de P-Bray que los ambientes de medio y bajo potencial. Esta tendencia no se observó en el lote 4 pero si en el lote 6, donde se observaron diferencias significativas en el contenido de fósforo entre los ambientes. Una explicación posible para este fenómeno es que haya un flujo considerable de agua desde los sitios de mayor a los de menor elevación. Esto podría significar que hay escurrimiento de fosforo hacía las zonas de alto potencial.

Efecto de la fertilización de P por zona de manejo

El efecto de la interacción entre P-Bray y ZM no fue significativo, indicando que la respuesta a la fertilización no es diferente entre ZM (**Figura 6**). Sin embargo, se deter-

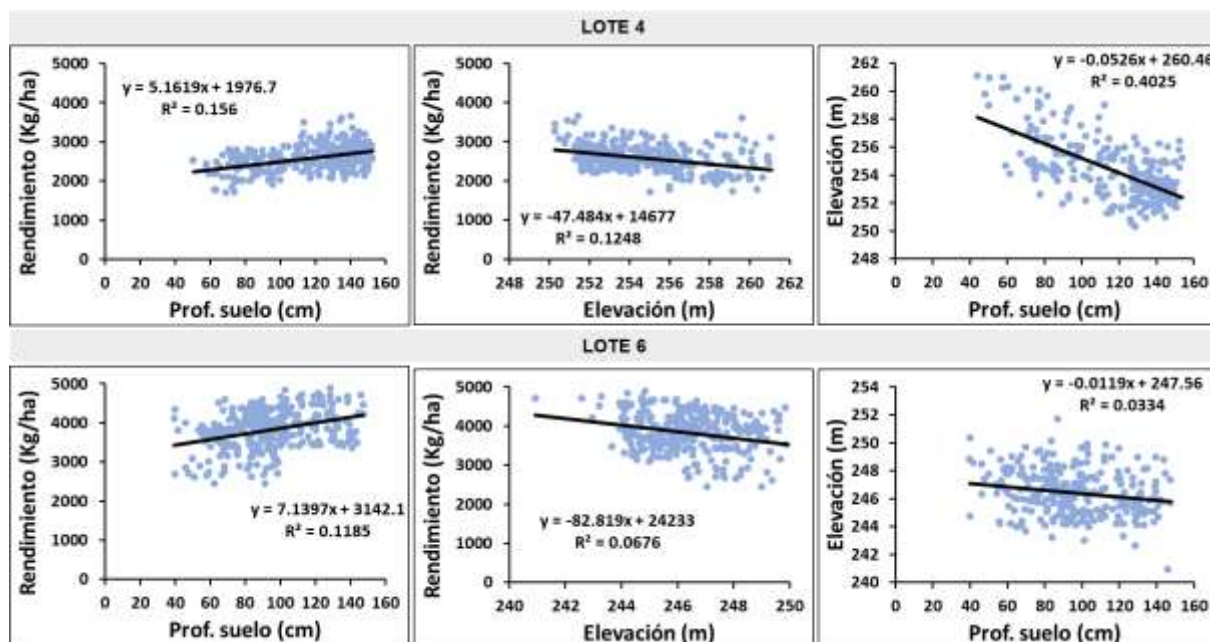


Figura 5. Relación entre el rendimiento en grano con la profundidad de suelo y la elevación del terreno para cada lote.

Figure 5. Relationship between the grain yield with the soil depth and terrain elevation for each field.



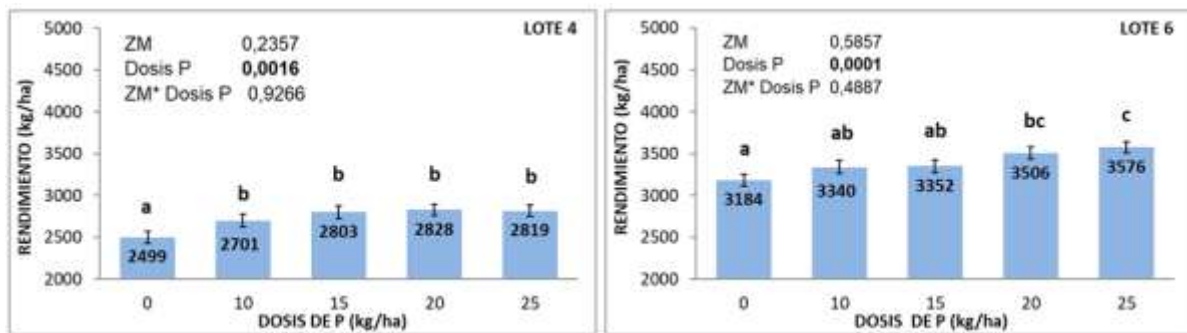


Figura 6. Rendimiento de soja para cada dosis de P aplicada en los lotes 4 y 6. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$). Las barras verticales indican el error típico de la media para dosis de P.

Figure 6. Soybean yield for each applied P rate at sites 4 and 6. Different letters indicate statistically significant differences ($p < 0,05$). Vertical bars indicate the standard error of the mean for each P rate.

minó un efecto significativo del agregado de P.

Se determinó un aumento de rendimiento en los tratamientos fertilizados respecto al testigo (**Figura 6**). Esto concuerda con la bibliografía existente, donde se describe respuesta a la fertilización cuando el nivel de P extractable en la capa superficial de los suelos presenta valores inferiores a 16 mg kg^{-1} de P Bray a 0-20 cm (Sucunza *et al.*, 2018). En el lote 4 el promedio de P Bray fue de $5,93$, el valor mínimo $2,6$ y el máximo $9,7 \text{ mg kg}^{-1}$. Estos son valores muy bajos y distantes del umbral de respuesta mencionado. La dosis mínima de P (10 kg ha^{-1}) provocó un incremento de 202 kg ha^{-1} de soja y fue la dosis de 20 kg ha^{-1} la que permitió alcanzar la mayor respuesta al agregado de P con 329 kg ha^{-1} (13% respecto al testigo) (**Figura 6**). Sin embargo, no existen diferencias significativas en el rendimiento al comparar las 4 dosis utilizadas en el ensayo. Con la dosis máxima (25 kg ha^{-1} de P) se alcanzó un aumento de rendimiento de 320 kg ha^{-1} y con 15 kg ha^{-1}

de P se logró incrementar 304 kg ha^{-1} . Hay que considerar que el lote 4 presenta valores de profundidad efectiva satisfactorios para la siembra de soja, pero pendientes muy pronunciadas y como consecuencia bajos valores de TWI.

En el lote 6 los valores de fósforo Bray oscilaron entre $5,3$ y $13,9$ y el promedio fue de $9,15 \text{ mg kg}^{-1}$. Está claro que el aumento de dosis de fosfato diamónico entre tratamientos siempre provocó un incremento en el rendimiento de soja (**Figura 6**). Los niveles de P-Bray resultaron bajos, pero superiores a los encontrados en el lote 4 y es posible que suficientes para que la performance del testigo haya sido levemente inferior que la de los tratamientos de 10 y 15 kg ha^{-1} de P, sin existir una diferencia significativa de rendimiento entre ellos. Las parcelas de 20 kg ha^{-1} provocaron un aumento en el rendimiento respecto al testigo y a los tratamientos de menores dosis aplicadas, pero solo significativa estadísticamente al compararla con los testigos. La dosis máxima de fósforo, 25 kg

ha⁻¹, permitió lograr un aumento de la producción de soja de 392 kg ha⁻¹ (12,3 %) al compararla con las parcelas sin fertilización. Existe una diferencia estadísticamente significativa con todos los tratamientos ($p < 0,05$), excepto con el tratamiento de 20 kg ha⁻¹ de P (**Figura 6**). Lo ocurrido en el lote 6 reafirma con mayor certeza que existe respuesta a la fertilización fosforada para niveles de P Bray debajo de 16 mg kg⁻¹ (Sucunza *et al.*, 2018; Antonangelo *et al.*, 2019). Este lote tiene

menor profundidad efectiva promedio, pero valores superiores de TWI.

La eficiencia de uso de fósforo (EUP) mide el incremento de rendimiento de soja por kg de P aplicado. El efecto de la interacción entre P aplicado como fertilizante y ZM resultó no significativo ($p > 0,05$). Pero se encontró un efecto significativo del efecto de la zona de manejo ($p < 0,05$), es decir que la EUP varía entre las ZM (**Figura 7**).

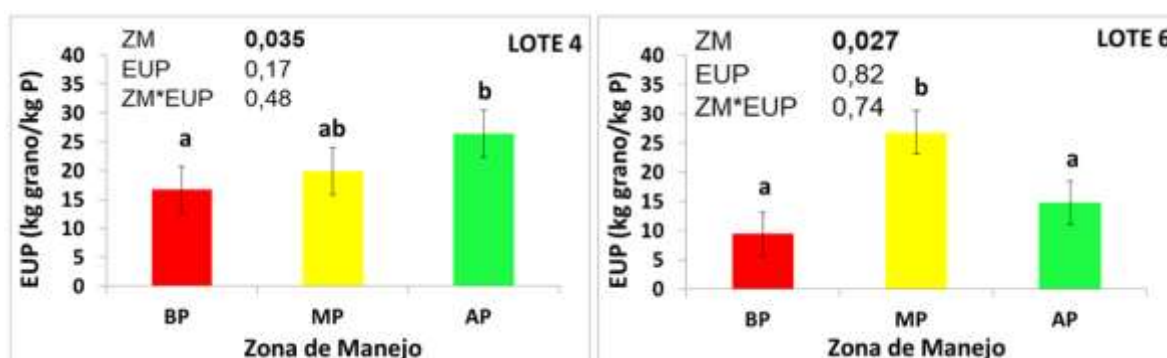


Figura 7. Eficiencia del uso de fósforo (EUP) promedio del fertilizante de acuerdo a dosis de fósforo y zona de manejo en soja. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$). Las barras verticales indican el error típico de la media para cada zona de manejo.

Figure 7. Average use efficiency of fertilizer phosphorus (EUP) according to phosphorus rates and management zone in Soybean. Different letters indicate statistically significant differences ($p < 0,05$). Vertical bars indicate the standard error of the mean for each zone.

En el lote 4, la zona de alta productividad asociada con menor cantidad de P-Bray presentó la mayor EUP, difiriendo con la zona de baja productividad (**Figura 7**). Esto indica que en los sitios de mayor potencial productivo histórico y menores valores de P-Bray en el suelo, la respuesta a la fertilización fosforada por unidad de fertilizante es mayor que en aquellos donde el potencial de rendimiento es menor y menores valores de P-Bray (Bermúdez & Mallarino, 2007; Simón *et al.*, 2013). En el

lote 6, la zona de media productividad presentó valores de EUP mayores a las zonas de baja y alta productividad (**Figura 6**). Se esperaba que la mayor EUP fuera encontrada en la zona de alto potencial.

CONCLUSIÓN

En este trabajo no se determinó interacción entre zonas de manejo y fertilización fosforada sobre el rendimiento del cultivo de soja, pero sí se encontraron diferencias significativas en la eficiencia uso

de P aplicado como fertilizante entre zonas de manejo, lo cual justificaría la aplicación de recomendaciones de fertilización con dosis variable.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a los investigadores Dra. V. Aparicio y Dr. H. Sainz Rozas de la Unidad Integrada INTA Balcarce por sus sugerencias y comentarios del manuscrito. Además, queremos agradecerle al señor A. Mosca por el soporte y ayuda para realizar las mediciones en el laboratorio de la Unidad Integrada INTA Balcarce.

BIBLIOGRAFÍA

- Alesso, CA; MA Pilatti; SC Imhoff & M Grilli . 2012. Variabilidad espacial de atributos químicos y físicos en un suelo de la pampa llana santafesina. *Ciencia del suelo* 30:85-93.
- Bermudez, MA & P Mallarino. 2007. Impacts of variable-rate phosphorus fertilization based on dense grid soil sampling on soil-test phosphorus and grain yield of corn and soybean. *Agron. J.* 99:822-832.
- Bray, R & L Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorous in soils. *Soils Sci.* 59: 29-45.
- Calviño PA; FH Andrade & VO Sadras. 2003. Maize yield as affected by water availability, soil depth, and crop management. *Agron. J.* 95: 275-281.
- Calviño, PA & M Redolatti. 2004. Respuesta al agregado de fósforo en el cultivo de soja en el sudeste de Buenos Aires 1: Elementos de diagnóstico. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 22-24 junio, Paraná, Entre Ríos, Actas en CD.
- Carta de suelos INTA. 2015. Instituto de Suelos, CIRN, CNIA.
- Córdoba M; C Bruno; JL costa; NR Peralta & M Balzarini. 2016. Multivariate methods in management zone delineation for precision agriculture. *Biosyst. Eng.* 143:95- 107.
- Echeverría, H; G Ferraris; G Gerster; F Gutiérrez Boem & F Salvagiotti. 2002. Fertilización en soja y trigo-soja: respuesta a la fertilización en la región pampeana. Resultados de la red de ensayos del Proyecto Fertilizar-INTA. Campaña 2000/01 y 2001/02. INTA EEA Pergamino, 43 p.
- Fridgen, JJ; NR Kitchen; KA Sudduth; ST Drummond & CW Fraisse. 2004. Management zone analysis (MZA): software for subfield management zone delineation. *Agron. J* 96: 100-108.
- García, FO & MF González Sanjuan. 2012. La nutrición de suelos y el balance de nutrientes ¿Cómo estamos? Fertilizar Asociación Civil. *Revista Fertilizar* 24.
- Haixiao L; M Alain; Z Noura; JM Aime; S Yichao; P Sylvain; P Leon-Etienne & M Christian. 2019. Long-term modeling of phosphorus spatial distribution in the no-tilled soil profile. *Soil Till. Res.* 187:119-134.
- Isaaks, EH & RM Srivastava. 1989. An introduction to applied geostatistics. New York, NY: Oxford 334 University Press. 561 p.
- Kravchenko, AN & DG Bullock. 2000. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agron. J.* 92:75-83.
- Mallarino, AP & DJ Wittry. 2004. Efficacy of grid and zone soil sampling approaches for site-specific assessment of phosphorus, potassium, pH, and organic matter. *Precision Agric.* 5:131-144.
- Peralta, NR; JL Costa; M Balzarini & H Angelini. 2013a. Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the Southeastern Pampas. *Can. J. Soil Sci.* 93:205-218.
- Peralta, NR; JL Costa; M Balzarini & M Castro Franco. 2013c. Delimitación de zonas de manejo con modelos de elevación digital y profundidad de suelo. *Interciencia* 38:1-7.
- Peralta, NR & JL Costa. 2013b. Delineation of management zones with soil apparent electrical



- conductivity to improve nutrient management. *Comput. Electron. Agr.* 99: 218-226.
- Peralta, NR; JL Costa; M Balzarini; M Castro Franco; M Córdoba & D Bullock. 2015. Delineation of management zones to improve nitrogen management of wheat. *Comput. Electron. Agr.* 110:103-113.
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D., & R. Core Team. (2014). nlme: Linear and nonlinear mixed effects models. R package version 3.1e118. URL <http://CRAN.R-project.org/package=nlme>, 670.
- Quantum GIS Development Team. 2016. Quantum GIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.
- R Core Team. (2015). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. URL <http://www.R-project.org/>.
- Rubio, G; FH Gutiérrez Boem & MJ Cabello. 2008. Estimating available soil phosphorus increases after phosphorus additions in Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72:1721-1727.
- Sainz Rozas, HE; N Wyngaard; M Eyherabide,.; G Larrea; N Martínez Cuesta,.; NI Reussi Calvo&; H Angelini. 2019. Cambios en la disponibilidad de nutrientes en la region pampeana. Actas XXVII Congreso AAPRESID. Rosario, 7 al 9 de agosto.
- Simon, M; NR Peralta & JL Costa. 2013. relationship between apparent electrical conductivity with soil properties and nutrients. *Ciencia del suelo* 31:45-55.
- Sucunza, FA; FH Gutierrez Boem; FO Garcia; M Boxler & G Rubio. 2018. Long-term phosphorus fertilization of wheat, soybean and maize on Mollisols: Soil test trends, critical levels and balances. *Eur. J. Agron.* 96:87-95.
- Unamunzaga, O; G Besga; A Castellon; MA Uson; P Chery; P Gallejones & A Aizpurua. 2014. Spatial and vertical analysis of soil properties in a Mediterranean vineyard soil. *Soil Use Manag.* 30:285-296.
- West, M; K Kim; DJ Kliebenstein; VH Leeuwe; RW Michelmore & S Doerge. 2007. Global eQTL mapping reveals the complex genetic architecture of transcript-level variation in Arabidopsis. *Genetics* 175:1441-1450

