

EVALUACION DE METODOLOGÍAS PARA LA DELINEACION DE ZONAS DE MANEJO DE FÓSFORO

Cecilia Inés Bonelli

Ingeniera Agrónoma

Director: Agustín Pagani

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Mar del Plata)

Msc. (Universidad Nacional de Mar del Plata Buenos Aires)

Ph.D. (Iowa State University)



EPG



FAUBA

ESPECIALIZACION FERTILIDAD DE SUELOS Y FERTILIZACION

Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

ÍNDICE

ÍNDICE.....	2
RESUMEN:.....	3
INTRODUCCIÓN:	3
OBJETIVO	5
HIPÓTESIS	5
MATERIALES Y MÉTODOS	6
RESULTADOS Y DISCUSION	10
CONCLUSIONES.....	23
BIBLIOGRAFÍA	23

RESUMEN:

En Argentina, no existen suficientes trabajos de investigación que comparen diferentes enfoques de zonificación para describir la variabilidad de fósforo (P) a nivel intra-lote. El objetivo de este trabajo fue comparar la eficacia de un esquema de muestreo de suelo en grilla y tres alternativas de muestreo dirigido para la delineación de zonas de manejo (ZM) de P dentro de lotes de producción de zonas contrastantes del país. En 13 lotes de la Región Pampeana y NOA, se realizó un relevamiento topográfico, de conductividad eléctrica aparente (ECa) del suelo, una estimación de productividad de cultivos de campañas anteriores a través de imágenes satelitales (índice de vegetación diferencial normalizado, NDVI) y un muestreo de suelo en grilla y se evaluaron a través de intervalos de confianza (90%) estos cuatro criterios para la delineación de ZM de P dentro de los lotes. El muestreo de suelo en grillas fue el criterio más eficaz para capturar la variabilidad espacial de P a nivel intra-lote en los sitios evaluados. Esta metodología permitió delinear zonas de P que fueron más contrastantes entre sí (mayor diferencia de P promedio entre ZM) y más homogéneas dentro de sí (menores desvíos estándares), en relación con los demás criterios de zonificación evaluados. Las ZM delineadas a partir de la interpolación del muestreo de suelo en grilla mostraron intervalos de confianza de P de menor tamaño y con menor frecuencia de superposición entre sí. La ECa, la elevación y el NDVI fueron criterios satisfactorios como herramienta de zonificación de P sólo en una baja proporción de los casos (entre 23% y 31%), particularmente en aquellos lotes con mayor variabilidad topográfica y textural, que normalmente están sujetos a una marcada heterogeneidad en la productividad de los cultivos, lo que genera un balance de P contrastante en lotes históricamente manejados con fertilización uniforme. Es necesario realizar estudios de este tipo en un mayor número de sitios, agrupando los resultados por zonas agroecológicas, para poder fortalecer y ampliar el alcance de estas conclusiones.

INTRODUCCIÓN:

El fósforo (P) es uno de los nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas y consecuentemente para la productividad de los sistemas agrícolas. Sin P la planta no podría completar su ciclo, ya que este nutriente se encuentra directamente involucrado en múltiples funciones metabólicas. El P participa en la síntesis de ácidos nucleicos y de membranas, glicólisis y metabolismos de los carbohidratos, entre otros procesos (Pierzynski *et al.*, 2005).

El P es un nutriente considerado poco móvil en el suelo. Las plantas absorben el P de la solución del suelo principalmente por el mecanismo de difusión e intercepción radical. Este proceso se da a muy poca distancia entre el nutriente y la raíz y por lo tanto requiere que el desarrollo de la raíz de la planta sea óptimo para así lograr máximo aprovechamiento del nutriente disponible en el suelo (Rubio *et al.*, 2001).

Los suelos de Argentina presentan una importante variabilidad en los niveles de P entre regiones determinada básicamente por la génesis propia de los mismos, como por la influencia antrópica que genera ingresos y egresos del nutriente en el agroecosistema (Vázquez, 2002). Los ingresos al sistema pueden darse mediante fertilización complementaria (fertilizantes

químicos en su mayoría) como por el aporte de los tejidos de las plantas que se descomponen y aportan a la materia orgánica del suelo. La cosecha representa el principal egreso del nutriente del sistema y es el historial agrícola uno de los determinantes en los niveles de P del suelo (Rubio *et al.*, 2001). La historia agrícola cobra importancia en primer lugar por la extracción del P y luego por el manejo clásico realizado por los productores en los que se adoptó una metodología de producción de tipo extractiva (sin reposición de todos los nutrientes extraídos por los cultivos), lo cual ha llevado al lento empobrecimiento de suelos, llegando a situaciones en donde los niveles actuales son limitantes para la producción (Sainz Rozas *et al.*, 2011).

Los requerimientos nutricionales de P varían por cultivo y dependen de muchos factores, pero se puede tomar como referencia los valores de 5, 4, 7 y 11 kg tn⁻¹ grano para trigo, maíz, soja y girasol, respectivamente (Ciampitti y García, 2010; Rubio *et al.*, 2021). Con los niveles productivos crecientes en los principales cultivos, resulta cada vez más necesaria la reposición de P en los suelos, a fin de que las plantas puedan alcanzar los máximos niveles de rendimiento sin ser limitados. Por lo anteriormente descrito respecto a las características del nutriente, la importancia para el sistema productivo y su interacción con el suelo es que resulta necesario comprender la variabilidad y distribución del P que surge de interacciones complejas entre la formación del suelo y las prácticas culturales (Mallarino *et al.*, 2005).

La agricultura de precisión es la aplicación de tecnologías y principios para gestionar la mencionada variabilidad espacial y temporal asociada a todos los aspectos de la producción agrícola con el fin de incrementar la eficiencia en el uso de los insumos, preservando la calidad ambiental (Pierce y Nowak, 1999). Uno de los enfoques propuestos que utilizan a la agricultura de precisión como herramienta para el manejo sitio-específico es el que se basa en la delimitación de zonas de manejo (ZM). Una ZM se define como una subregión dentro de un lote que expresa una combinación homogénea de los factores limitantes de rendimiento para los cuales es apropiada una dosis única de un insumo específico (Doerge, 1999). Existen diferentes criterios para la delineación de ZM como el muestro de suelo en grilla (Wollenhaupt *et al.*, 1994), el uso de mapas de rendimiento de cultivos anteriores (Ferguson *et al.*, 2003), topografía (Franzen *et al.*, 2000), conductividad eléctrica aparente (Lund *et al.*, 1999), tipo de suelo (Pautasso *et al.*, 2010) e imágenes espectrales asociadas a la productividad vegetal (Basso, 2012), entre otros.

La topografía puede influir marcadamente sobre los rendimientos (Kravchenko y Bullock, 2000; Franzen *et al.*, 2000). En este sentido, los modelos digitales de elevación (DEM) permiten caracterizar la variabilidad altimétrica de un lote y calcular derivados topográficos integradores, útiles para entender patrones espaciales de productividad, como la pendiente y el área de acumulación de agua (Kaspar *et al.*, 2003; Ruffo *et al.*, 2006; Espósito, 2013; Balboa, 2014). La conductividad eléctrica aparente (CEa), que es la medición in situ de la capacidad del suelo para conducir corriente eléctrica (Doerge, 1999; Lund *et al.*, 1999), está influenciada por una combinación de propiedades fisicoquímicas del suelo como la textura, la MO, la capacidad de intercambio catiónico y el contenido de sales (Mc Bride *et al.*, 1990; Sudduth *et al.*, 1995; Jaynes, 1996). Estas propiedades, inciden sobre la infiltración y el almacenaje de agua (Jaminson *et al.*, 1968), que frecuentemente se relacionan con la variación del rendimiento de los cultivos (Kachanoski *et al.*, 1988; Kitchen *et al.*, 1999). Simón *et al.* (2013) validaron la relación entre CEa y algunas propiedades del suelo como arcillas, arenas y material orgánica en suelos del sur de

Córdoba; validando la herramienta como confiable para estimar la variabilidad espacial en relación con algunas propiedades del suelo. El empleo del índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI, Rouse *et al.*, 1973) obtenido mediante el procesamiento de imágenes espectrales de origen satelital ha ganado popularidad en los últimos años como criterio simple y económico para delinear ZM. Si bien estas herramientas han sido sugeridas como valiosas para determinar variabilidad intra-lote de muchas características, su utilidad para entender la variabilidad espacial de la fertilidad fosforada no ha sido debidamente explorada en Argentina.

Numerosos estudios internacionales han sugerido que la variabilidad espacial de la disponibilidad de P de un lote no siempre está relacionada a variaciones en el tipo de suelo, por lo que han sugerido a los muestreos de suelo en grilla como superiores en relación con cualquier tipo de muestreo dirigido o en zona (Franzen y Peck, 1993; Wollenhaupt *et al.*, 1994; Mallarino y Wittry, 2004). La importancia del muestreo radica en que es la principal fuente de error en el diagnóstico (Carretero *et al.*, 2015). Si bien este tipo de muestreos presenta ventajas desde el punto de vista de la confiabilidad y precisión, su mayor costo y laboriosidad demanda contar con información para decidir en qué condiciones su implementación es necesaria. En un estudio reciente, Pagani y Rompani, 2022 simularon la rentabilidad de la fertilización variable con P en base a un muestreo de suelo en grilla en más de 350 lotes agrícolas en Argentina y concluyeron que las mayores ventajas económicas en maíz, soja y trigo respecto al manejo de P con dosis uniforme se obtenían en los lotes con mayor variabilidad espacial en la fertilidad fosforada, pero especialmente, cuando la disponibilidad de P promedio del lote se encontraba entre 10 y 20 mg kg⁻¹.

En Argentina, no existen trabajos locales que comparen diferentes enfoques de zonificación para describir la variabilidad espacial de la fertilidad fosforada en un número de lotes lo suficientemente grande como para abarcar diferentes regiones del área agrícola argentina. Esta información sería de gran utilidad para poder adaptar el esquema de muestreo de suelo más apropiado en cada situación y así ganar escala en la adopción de tecnologías de fertilización fosforada con dosis variable, atendiendo así a las demandas de la sociedad y las nuevas exigencias de los países a los cuales Argentina exporta su producción.

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo fue comparar la eficacia de cuatro esquemas de muestreo de suelo: uno en grilla y tres alternativas de muestreo dirigido basados en la elevación del terreno, la ECa y el NDVI promedio de cultivos anteriores, para la delimitación de zonas de manejo de P dentro de lotes de producción de zonas contrastantes de Argentina.

HIPÓTESIS

Las zonificaciones basadas en el muestreo de suelo en grilla, elevación, ECa y NDVI, son igualmente eficaces para delimitar zonas de manejo de P tendientes a maximizar la variabilidad de P entre zonas y disminuirla dentro de cada zona.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron 13 lotes de producción situados en las provincias de Salta, Santiago del Estero, Córdoba, Santa Fé, Entre Ríos, La Pampa y Buenos Aires (Figura 1). Estos lotes se encontraban bajo una rotación agrícola que incluía maíz, soja, trigo, girasol y poroto y representan adecuadamente la diversidad edáfica (Tabla 1) de la Región Pampeana y NOA.

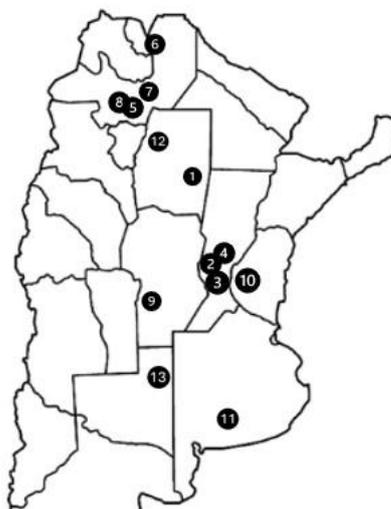


Figura 1: Mapa de Argentina mostrando la ubicación de los lotes relevados.

Tabla 1: Localidades y clasificación taxonómica de los suelos principales de cada sitio.

Sitio	Provincia	Localidad	Subgrupo de suelo
1	Santiago del Estero	Quimilí	Argiustol típico
2	Santa Fe	Cañada Rosquín 2	Argiudol acuico
3	Santa Fe	Cañada Rosquín 3	Argiudol acuico
4	Santa Fe	Cañada Rosquín 1	Argiudol acuico
5	Salta	Rosario de la Frontera 2	Argiustol típico
6	Salta	Orán	Udifluvente mólico
7	Salta	Metán	Hapludol entico
8	Salta	Rosario de la Frontera 1	Argiustol típico
9	Córdoba	Rio Cuarto	Hapludol éntico
10	Entre Ríos	Gualeduay	Argiudol vértico
11	Buenos Aires	Tres Arroyos	Argiudol típico
12	Santiago del Estero	Pozo Hondo	Argiustol típico
13	La Pampa	General Pico	Haplustol éntico

En los 13 lotes seleccionados se realizó un relevamiento previo a la siembra de los cultivos. Los lotes de la provincia de Salta fueron relevados durante el mes de noviembre de 2020 para

ser sembrados con maíz durante la campaña 2020/2021. Los lotes de Buenos Aires fueron muestreados durante los meses de abril a julio para siembras de trigo durante 2021 y finalmente los lotes de Rio Cuarto, Santa Fe, Entre Ríos y Santiago del Estero se muestrearon de septiembre a diciembre de 2021 para ser sembrados con maíz en la campaña 2021/2022.

El trabajo de caracterización ambiental intensiva se basó en cuatro fuentes de información:

- 1) Muestreo de suelo en grilla,
- 2) Relevamiento CEa del suelo,
- 3) Relevamiento de elevación del terreno,
- 4) Combinación de mapas de NDVI de cultivos anteriores.

El relevamiento de CEa del suelo a 90 cm de profundidad se realizó en transectas distanciadas aproximadamente 25 m utilizando el sensor Veris 3100 (Veris Technologies, Salina, Kansas, USA). Además, se realizó un relevamiento de altimetría mediante un sistema de posicionamiento global (GPS) de doble frecuencia con precisión dinámica en tiempo real (RTK, Trimble 5700, USA) que registra la posición cada 1 segundo y otorga precisión subcentimétrica (Figura 3). La medición de la CEa y elevación para todos los lotes se realizó en el período de barbecho y cuando el suelo se encontraba con contenidos de humedad cercano a capacidad de campo (McCutcheon *et al.*, 2006).

Debido a que no se contaba con mapas de rendimiento de cultivos anteriores de buena calidad en todos los sitios, se seleccionaron imágenes satelitales (Sentinel 2, Land Viewer, 2017) de al menos tres campañas anteriores con el objetivo de determinar los patrones espaciales de productividad de los lotes. Las fechas de las imágenes se establecieron considerando las etapas críticas de determinación de rendimiento de los cultivos de grano (Andrade *et al.*, 1995), momento en el que se puede evidenciar con mayor precisión el potencial grado de variabilidad espacial de un lote de producción. A cada imagen se le calculó el NVDI $[(IRC-R) / (IRC+R)]$, donde: IRC es la reflectividad en el infrarrojo cercano (longitud de onda de 760-900 nm) y R es la reflectividad en el rojo (longitud de onda de 630-690 nm)] y luego se promediaron todas las imágenes a fin de obtener un indicador de la productividad y variabilidad espacial de los sitios experimentales.

Se tomaron muestras de suelo siguiendo un esquema de muestreo en grillas alineadas con una intensidad de 1 muestra (compuesta por 10 submuestras a 20 centímetros de profundidad) cada 1.6 has (Figura 1). Las muestras de suelo fueron secadas, molidas, tamizadas y analizadas para P según la metodología de Bray-1 (Frank *et al.*, 1998).

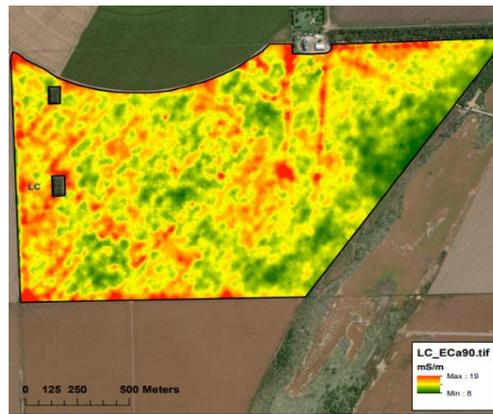


Figura 2: Mapa interpolado conductividad eléctrica aparente (CEa)

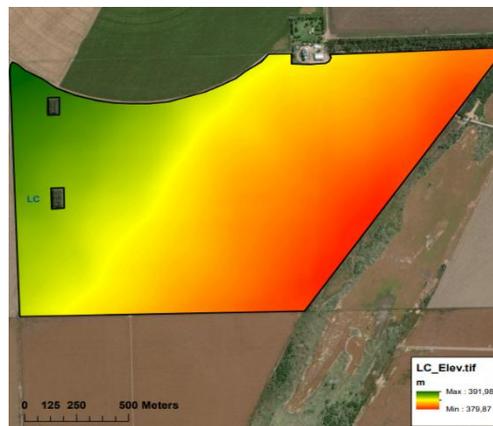


Figura 3: Mapa interpolado de elevación del terreno en el Sitio 9, Rio Cuarto, Córdoba

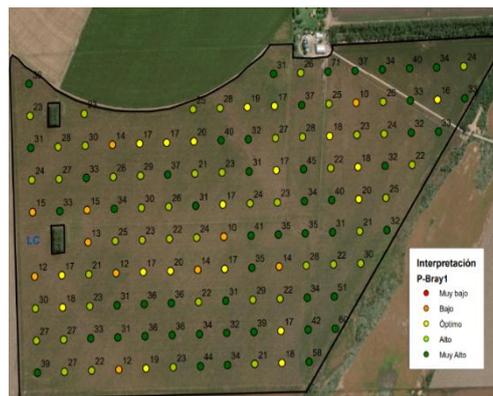


Figura 4: Mapa de fósforo (P) Bray-1 muestreado en grillas cada 1,6 has en el Sitio 9, Rio Cuarto, Córdoba

Los valores de CEa, elevación, NDVI promedio y los puntos de suelo proveniente del muestreo en grilla fueron interpolados usando ArcGIS 10.6 (ESRI, 2018, Redlands, CA, USA) mediante Kriging ordinario (Goovaerts, 1997) en una grilla regular de 5 x 5 m. Con la información proveniente del relevamiento, se delinearon de dos a seis zonas de manejo (dependiendo del nivel de variabilidad) con el programa QGIS 3.32.3 estableciendo cuatro criterios de muestreo de suelo: en base a las zonas de elevación, ECa y NDVI, simulando un esquema de muestreo dirigido en zona y finalmente en base a las zonas delineadas en función de la interpolación del muestreo de suelo en grillas.

Las consideraciones particulares tenidas en cuenta para delimitación de zonas de manejo fueron las siguientes:

- Se estableció un máximo de seis ZM por lote y un mínimo de dos, dependiendo del nivel de variabilidad de los cuatro criterios de zonificación evaluados.

- Para todos los criterios se buscó que las zonas comprendieran al menos dos puntos de muestreo dentro de su zona, es decir que si una zona no cumplía este requerimiento se combinaba con la adyacente.

- Cuando las zonas delineadas fueron muy pequeñas (inferiores a 0,5 has) o muy angostas y difíciles de contemplar en la práctica con un sistema de fertilización variable, se las anexó a la zona adyacente.

- Para el caso de los resultados del muestreo de suelo se determinaron cinco zonas de disponibilidad de P siguiendo las clases de interpretación sugeridas por Sawyer *et al.* (2002). Estas clases establecen las categorías “muy bajo”, “bajo”, “optimo”, “alto” y “muy alto” a los rangos < 7, 7-14, 15-20, 21-30 y > 30 mg kg⁻¹ P-Bray1, respectivamente. Cabe destacar que no todos los lotes contaban con una variabilidad de P suficiente para contemplar las cinco categorías de interpretación.

Para cada lote y zona delineada en base a los cuatro criterios de zonificación evaluados se calculó el promedio y el desvío estándar de los puntos de P provenientes del muestreo de suelo en grilla. Para cada sitio se seleccionó el o los criterios de zonificación que permitieran maximizar las diferencias de P entre zonas de un lote y minimizar la variabilidad de P dentro de las mismas. Para lograr este objetivo, se calcularon intervalos de confianza (90%) para cada uno de los promedios de P de cada zona perteneciente a los cuatro criterios de zonificación evaluados y se categorizó el criterio como “eficaz” para capturar la variabilidad espacial de P a nivel intra-lote si al menos el 50% de los intervalos de confianza no superponía sus límites. Se le asignó un número uno a aquellos criterios que lograron cumplir este requerimiento (eficaces) y un cero a los que no lo cumplieron. Por ejemplo, si utilizando un determinado criterio de zonificación en un lote se habían delineado cinco zonas y sólo dos de ellas no superponían sus límites de confianza (40%), se consideró al criterio de zonificación como “no eficaz”, pero si el lote tenía tres zonas y dos de ellas lograron no superponerse (66,6%), el criterio de zonificación fue considerado “eficaz” para ese lote. De esta manera se generó un ranking de eficacia de los criterios de zonificación evaluados. Una forma similar para evaluar la robustez de un criterio de delineación de zonas dentro de un lote fue anteriormente sugerida por Mallarino y Wittry (2004). Si bien esta metodología de evaluación de criterios de zonificación presenta algunas limitaciones y cierto

grado de subjetividad, fue seleccionada sobre otros métodos (como correlaciones o regresiones lineales) por considerarla de una buena relación entre complejidad, flexibilidad y confiabilidad.

RESULTADOS Y DISCUSION

Los sitios relevados presentaron niveles contrastantes de variabilidad espacial en sus propiedades edáficas y topográficas, en la productividad agrícola (caracterizado mediante el relevamiento de elevación, ECa y el historial de NDVI, datos no mostrados) y en la disponibilidad de P (Tabla 2). Los Sitios 7 y 11, presentaron los niveles más bajos de P (en la categoría de interpretación baja y muy baja según Sawyer *et al.* (2002), aunque con niveles de variabilidad intra-lote intermedios para el Sitio 11 (CV 33%) pero muy altos para el Sitio 7 (CV 89%). Los Sitios 1, 6, 8 y 12 presentan valores muy altos de P, pero con niveles de variabilidad intermedios (Tabla 2) a excepción del Sitio 1 donde se observó una marcada homogeneidad espacial (CV 17%). En el resto de los sitios se observaron valores de P en general cercanos al rango óptimo para la mayoría de los cultivos (Sawyer *et al.*, 2002), pero con niveles variables de heterogeneidad espacial. Algo interesante para resaltar es que se observó una relación lineal negativa entre el CV y el valor promedio de P del lote ($R^2 = 0.4$, datos no mostrados), sugiriendo que la variabilidad espacial de P (considerada en términos relativos) tendió a aumentar a medida que disminuyó el nivel promedio de fertilidad fosforada del lote.

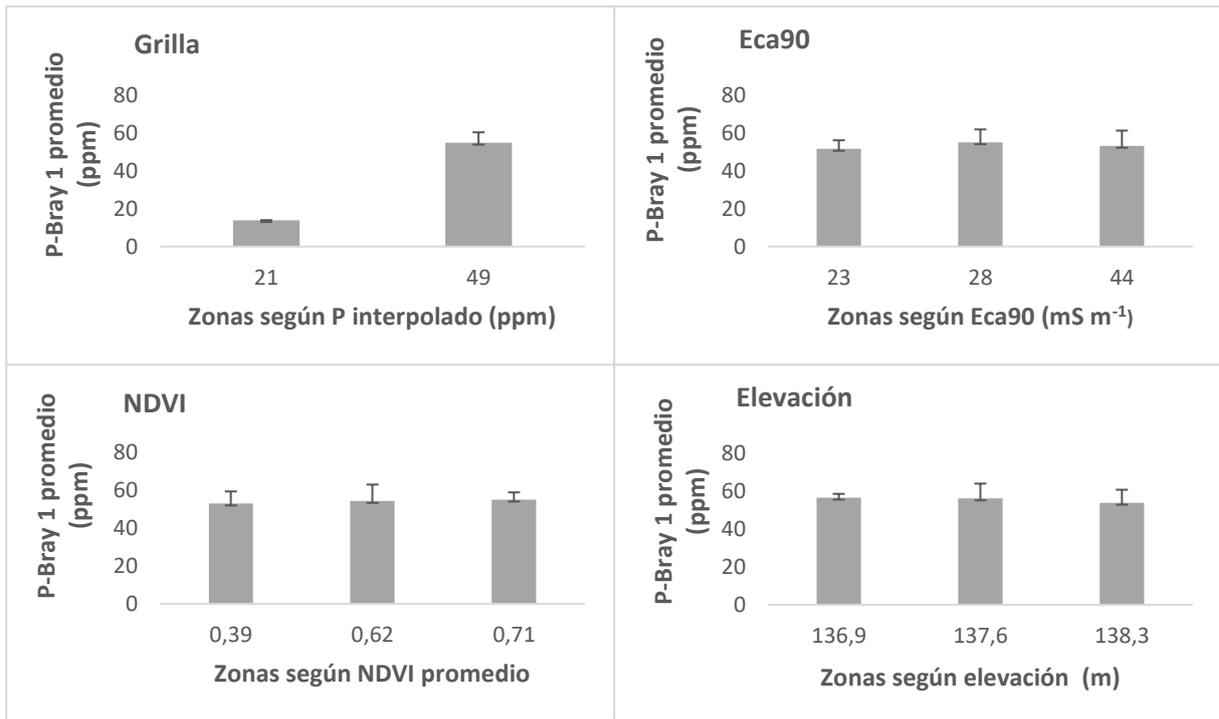
Esta heterogeneidad edáfica, topografía, productiva y en los niveles de P en el suelo entre y dentro de lotes representa adecuadamente la situación actual de la fertilidad fosforada del área agrícola argentina, por lo que el análisis realizado se considera satisfactoriamente representativo a nivel nacional. Sin embargo, es importante destacar que una proporción importante de los lotes relevados provienen de la zona norte del país con niveles de P mas altos que los de la región pampeana.

Tabla 2: Estadísticas descriptivas de variabilidad espacial de la disponibilidad de fósforo (P-Bray1) para los 13 sitios relevados.

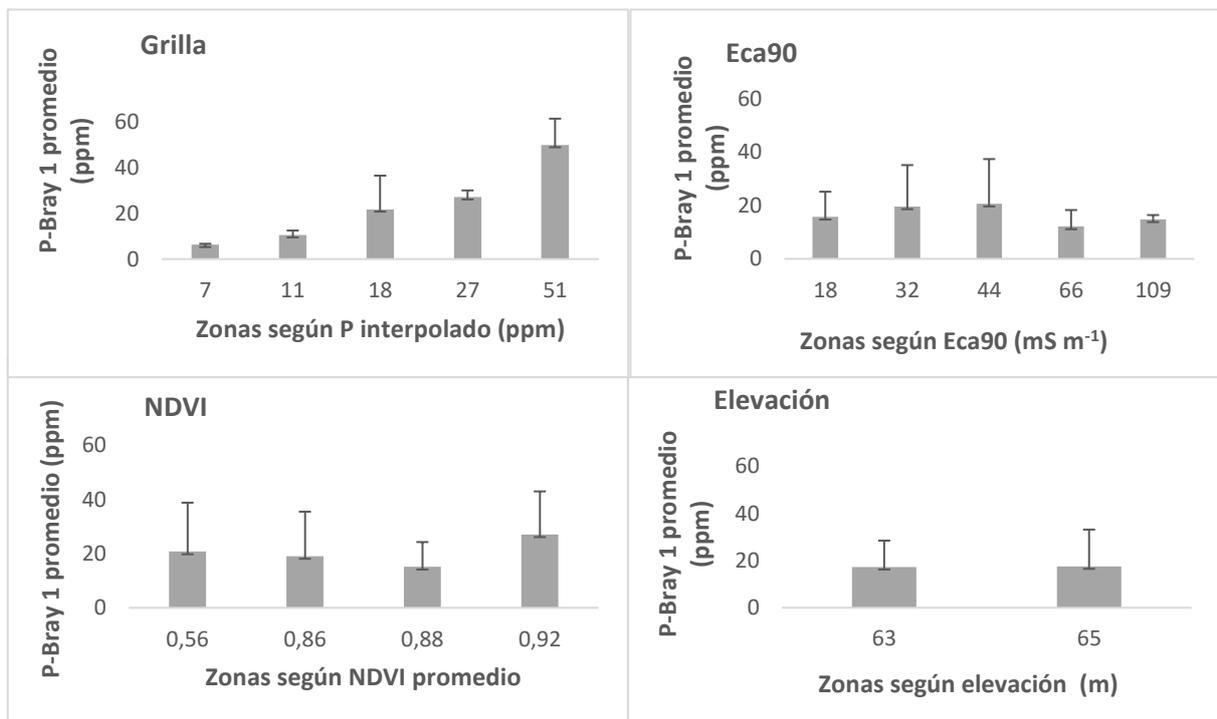
Sitio	Promedio	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvío Standard	CV*
	----- mg kg ⁻¹ -----					%
1	54	56	9	65	9	17
2	17	13	6	71	13	76
3	25	24	16	51	8	32
4	26	25	14	44	7	27
5	18	18	2	44	10	55
6	61	59	24	99	17	28
7	9	8	3	78	8	89
8	38	36	11	76	18	47
9	28	27	10	71	10	36
10	15	11	3	47	10	67
11	6	5	2	15	2	33
12	46	50	18	79	12	26
13	26	24	13	60	9	35

*CV, Coeficiente de variación

Sitio 1. Quimilí.

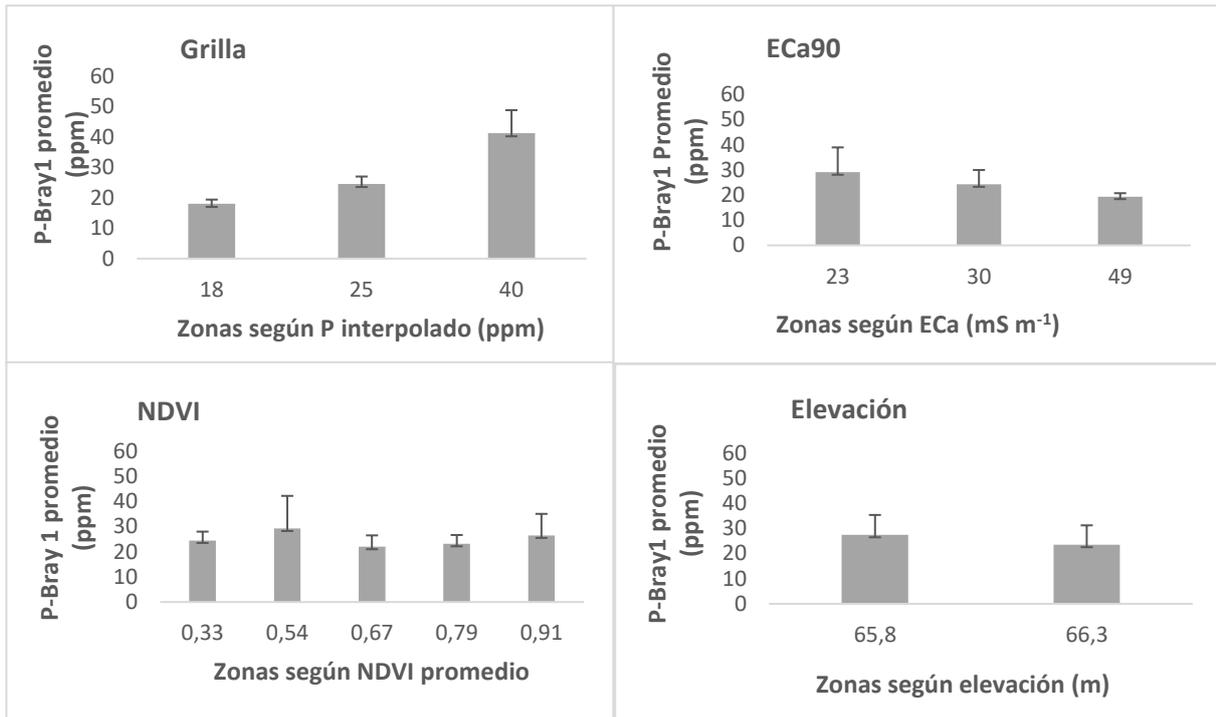


Sitio 2. Cañada Rosquín 2.

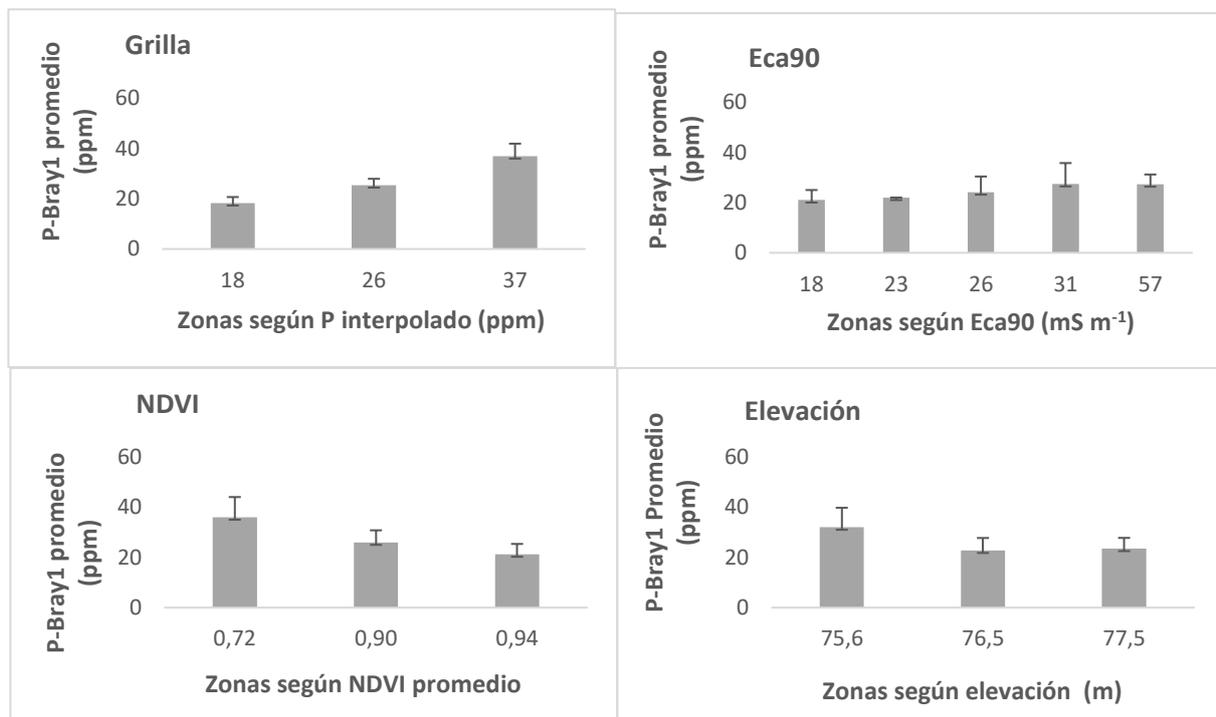


Figuras 5 (Sitio 1) y 6 (Sitio 2): Fósforo disponible (P-Bray1) promedio y desvío estándar (barras verticales) para zonas dentro del lote delineadas en función de (a) la interpolación del muestreo de suelo en grilla, (b) la conductividad eléctrica aparente a 90 cm (Eca90), (c) el promedio del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) de al menos tres cultivos anteriores y (d) la elevación del terreno.

Sitio 3. Cañada Rosquín 3:

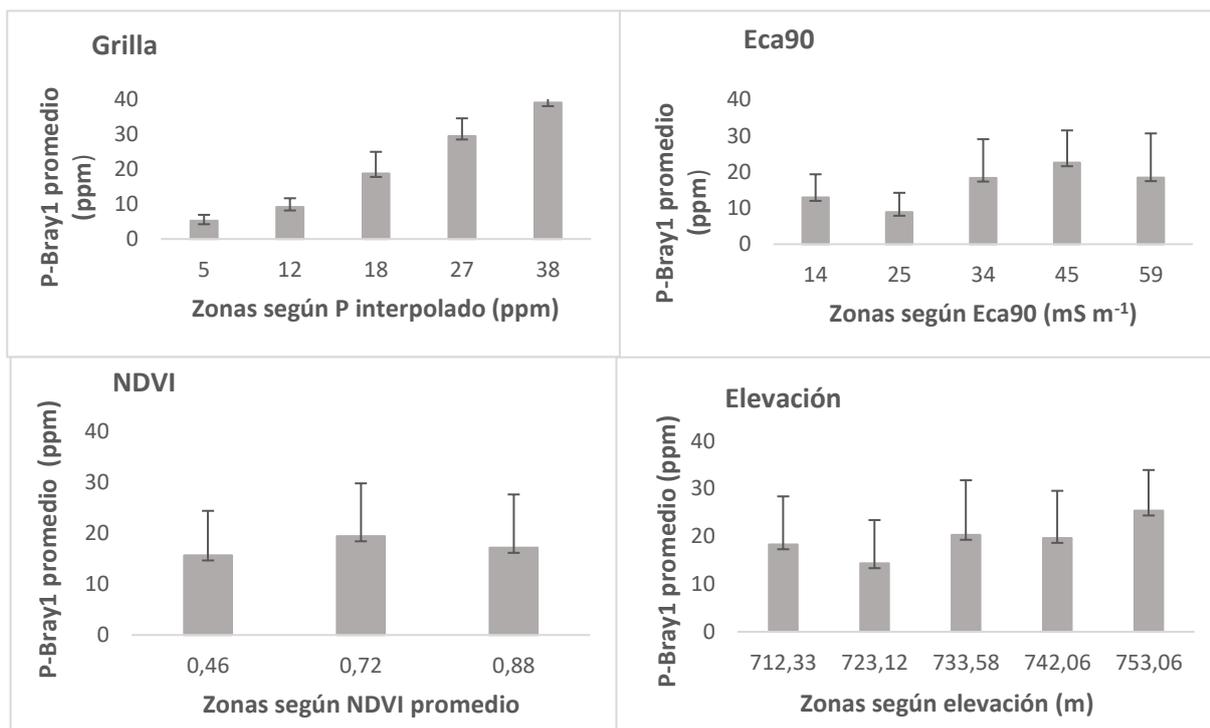


Sitio 4. Cañada Rosquín 1:

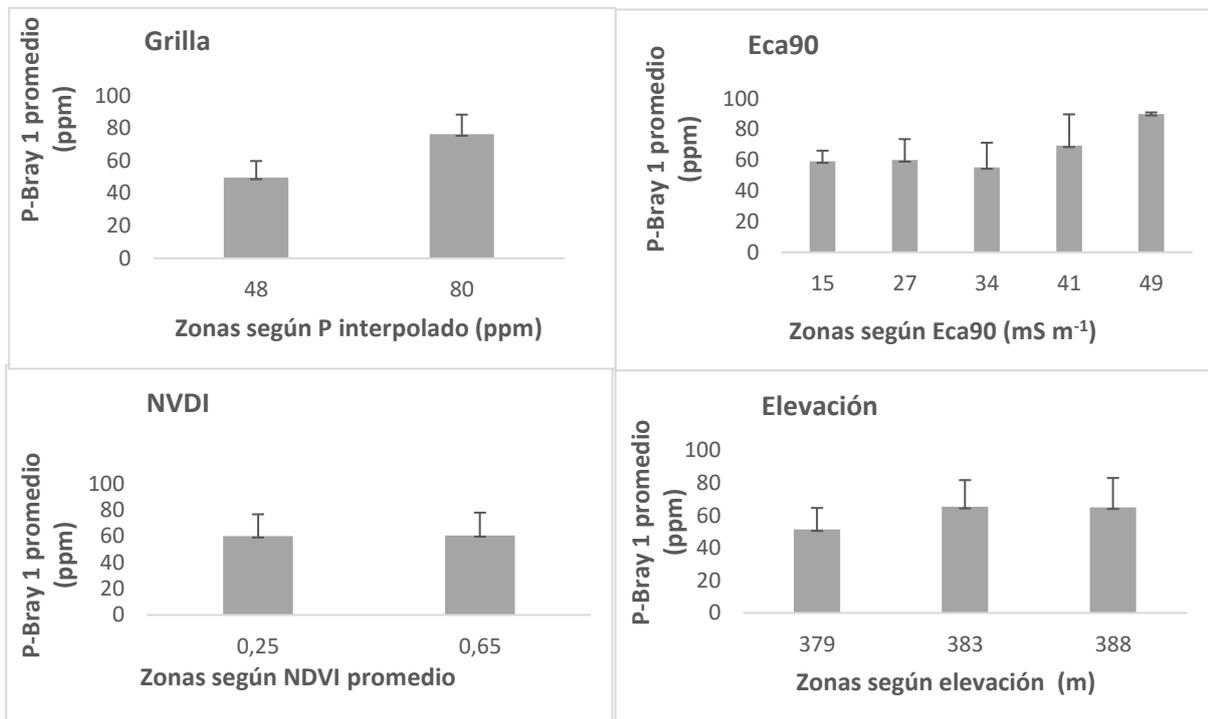


Figuras 7 (Sitio 3) y 8 (Sitio 4): Fosforo disponible (P-Bray1) promedio y desvío estándar (barras verticales) para zonas dentro del lote delineadas en función de (a) la interpolación del muestreo de suelo en grilla, (b) la conductividad eléctrica aparente a 90 cm (ECa90), (c) el promedio del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) de al menos tres cultivos anteriores y (d) la elevación del terreno.

Sitio 5. Rosario de la Frontera 2:

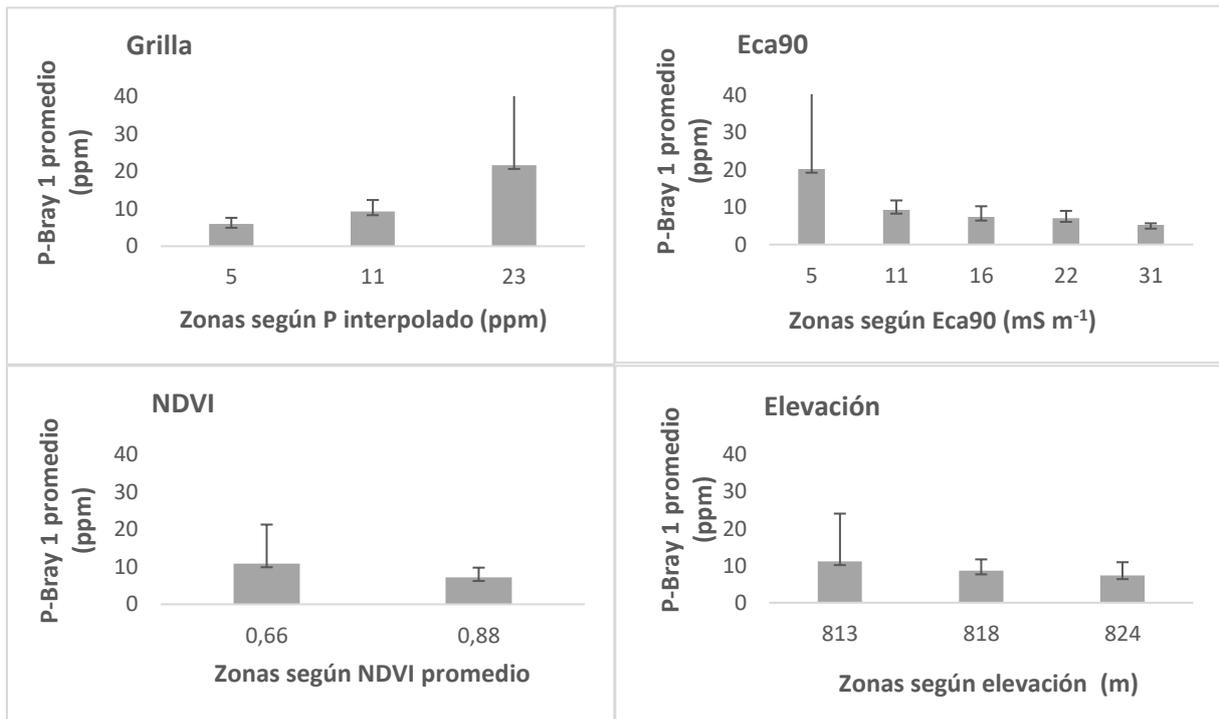


Sitio 6. Oran:

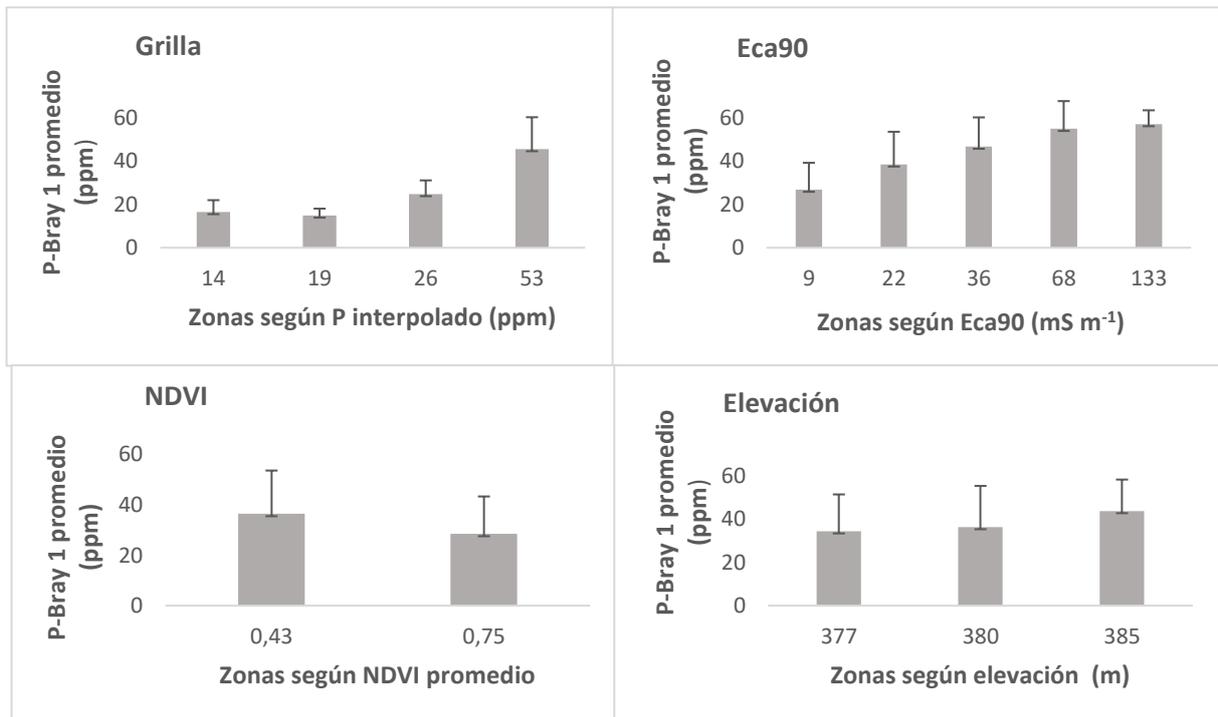


Figuras 9 (Sitio 5) y 10 (Sitio 6): Fósforo disponible (P-Bray1) promedio y desvío estándar (barras verticales) para zonas dentro del lote delimitadas en función de (a) la interpolación del muestreo de suelo en grilla, (b) la conductividad eléctrica aparente a 90 cm (Eca90), (c) el promedio del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) de al menos tres cultivos anteriores y (d) la elevación del terreno.

Sitio 7. Metan:

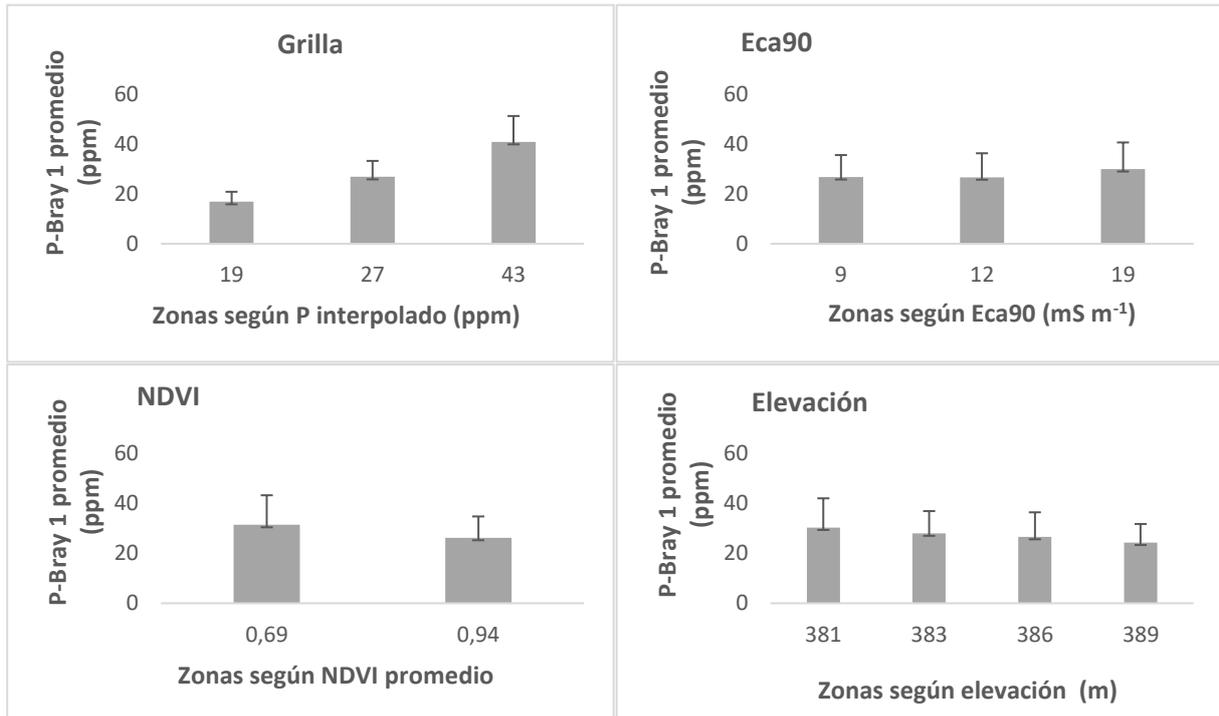


Sitio 8: Rosario de la Frontera 1:

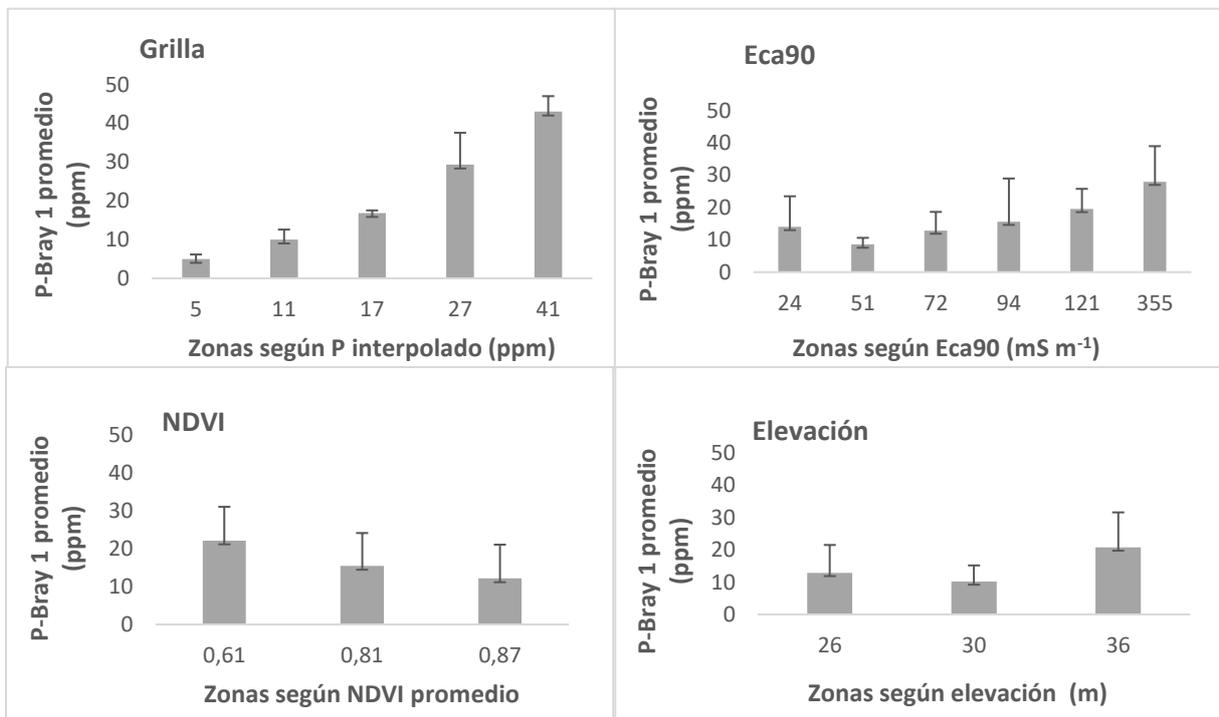


Figuras 11 (Sitio 7) y 12 (Sitio 8): Fósforo disponible (P-Bray1) promedio y desvío estándar (barras verticales) para zonas dentro del lote delineadas en función de (a) la interpolación del muestreo de suelo en grilla, (b) la conductividad eléctrica aparente a 90 cm (Eca90), (c) el promedio del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) de al menos tres cultivos anteriores y (d) la elevación del terreno.

Sitio 9. Río Cuarto, Córdoba

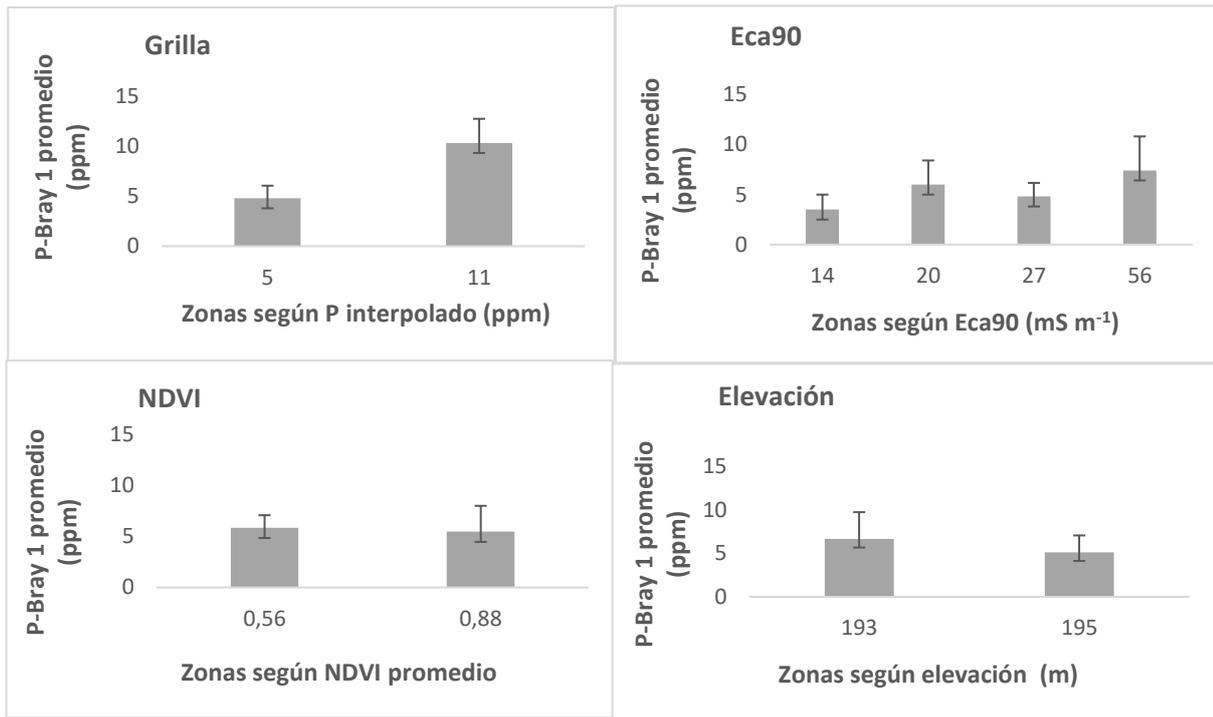


Sitio 10. Gualeguay, Entre Ríos

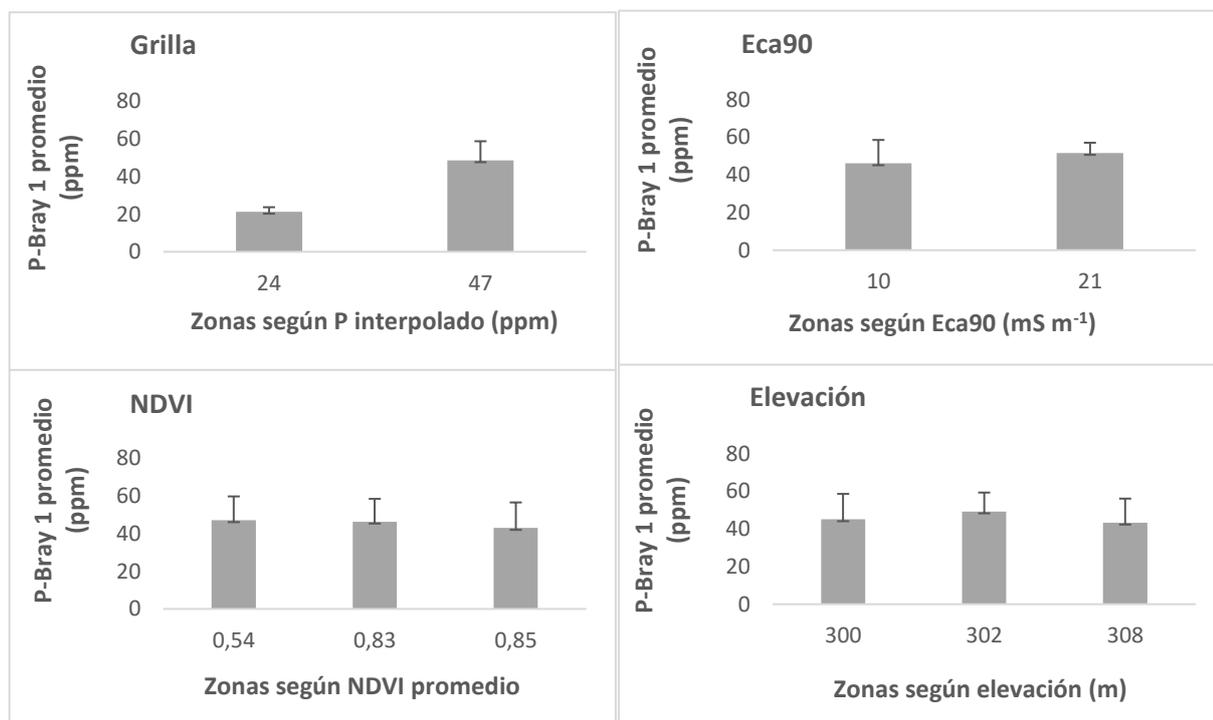


Figuras 13 (Sitio 9) y 14 (Sitio 10): Fósforo disponible (P-Bray1) promedio y desvío estándar (barras verticales) para zonas dentro del lote delineadas en función de (a) la interpolación del muestreo de suelo en grilla, (9) la conductividad eléctrica aparente a 90 cm (Eca90), (c) el promedio del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) de al menos tres cultivos anteriores y (d) la elevación del terreno.

Sitio 11. Tres Arroyos, Buenos Aires

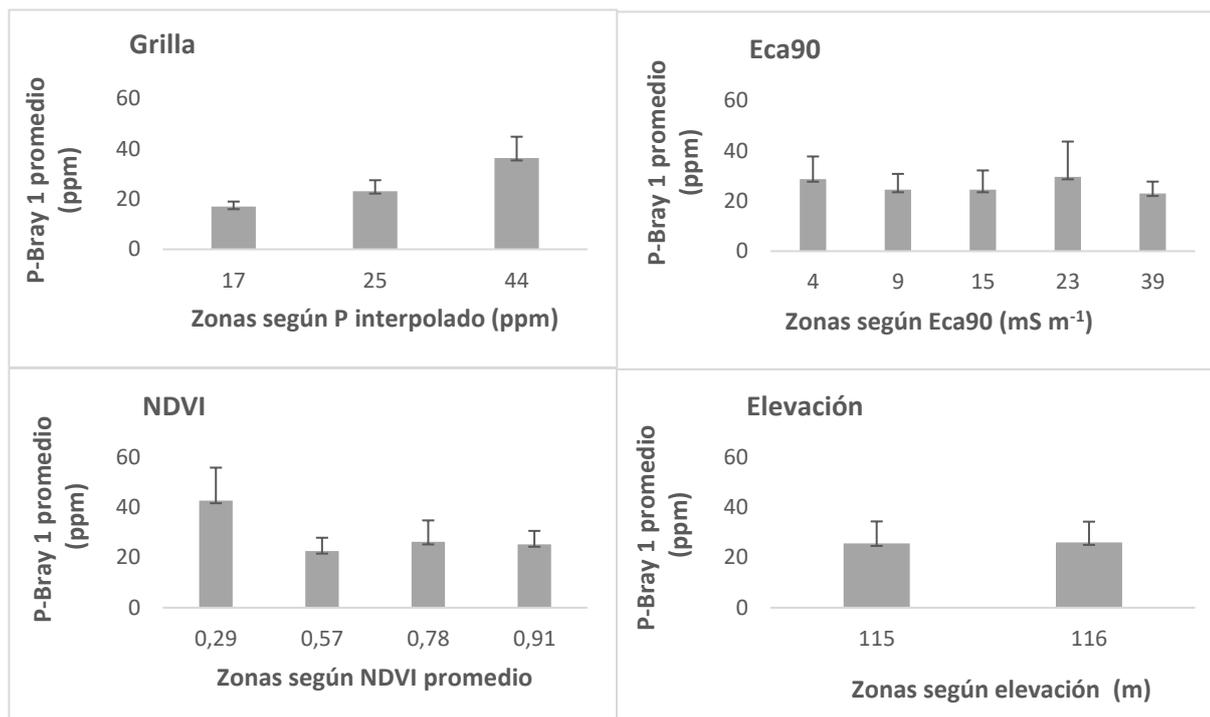


Sitio 12. Pozo Hondo, Santiago del Estero.



Figuras 15 (Sitio 11) y 16 (Sitio 12): Fosforo disponible (P-Bray1) promedio y desvío estándar (barras verticales) para zonas dentro del lote delineadas en función de (a) la interpolación del muestreo de suelo en grilla, (b) la conductividad eléctrica aparente a 90 cm (Eca90), (c) el promedio del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) de al menos tres cultivos anteriores y (d) la elevación del terreno.

Sitio 13. General Pico, La Pampa



Figuras 17 (Sitio 13) Fosforo disponible (P-Bray1) promedio y desvío estándar (barras verticales) para zonas dentro del lote delineadas en función de (a) la interpolación del muestreo de suelo en grilla, (9) la conductividad eléctrica aparente a 90 cm (Eca90), (c) el promedio del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) de al menos tres cultivos anteriores y (d) la elevación del terreno.

En todos los sitios, la zonificación realizada a partir de la interpolación del muestreo de suelo en grilla fue efectiva para separar áreas contrastantes en la disponibilidad promedio de P dentro del lote y relativamente homogéneas (moderados desvíos estándares) dentro de sí (Figuras 5 a 17 y Tablas 3 y 4). El número de zonas delineadas mediante este criterio varió de dos (Sitios 1, 6, 11 y 12) a cinco (Sitios 2 y 10), dependiendo del rango de disponibilidad de P presente. Los Sitios 1, 3, 4, 6, 9 y 12 presentaron valores de P dentro o por encima del rango de disponibilidad considerado como óptimo para la mayoría de los cultivos (15-20 ppm Bray-1, Sawyer *et al.*, 2002, Sucunza *et al.*, 2018), mientras que el resto de los sitios mostraron un nivel de variabilidad interesante desde el punto de vista agronómico y, por lo tanto, gran potencial para el manejo sitio-específico de la fertilización fosforada. Esto representa que en dichos sitios mediante la fertilización con dosis variable podrían potencialmente obtenerse, ahorros de fertilizante en las zonas dentro de los lotes con P alto y muy alto, e incrementos adicionales de rendimiento en las zonas de P muy bajas, respecto a un planteo de fertilización uniforme que no contemple dicha variabilidad. Otros trabajos nacionales e internacionales también han informado ventajas del muestreo de suelo denso para describir con precisión la distribución espacial de P a nivel intra-lote (Gutiérrez Böem y Marazas, 2004; Bermúdez y Mallarino, 2007). En este sentido, algunos trabajos (Franzen y Peck, 1995; Schepers *et al.*, 2000) han mostraron el riesgo que se corre en realizar mapas erróneos de P cuando se tiende a disminuir la densidad de muestreo.

Debido al costo y laboriosidad del muestreo de suelo en grilla, muchos investigadores han propuesto el muestreo en zona, siempre y cuando se mantenga información aceptable acerca de la variabilidad del nutriente en el lote. La gran diferencia conceptual entre el muestreo en grilla y el muestreo en zona (además de la mayor intensidad del muestreo en grilla) es que con el primero se generan áreas o puntos dentro del lote con valores de disponibilidad de P real

(medida) y se estiman las áreas o puntos desconocidos a través de diferentes métodos de interpolación, mientras que para el muestreo en zonas se asume que las áreas previamente definidas serán homogéneas en su disponibilidad de P. Generalmente se recomienda al muestreo en zona para aquellas situaciones donde la disponibilidad de P obedece a algún patrón predecible y temporalmente estable (Franzen y Nanna, 2002). Si se dan estas características, la determinación de zonas de muestreo puede variar significativamente en función del criterio utilizado.

Una de las técnicas más antiguas de muestreo de suelos en zonas es siguiendo el mapa de tipo de suelo en regiones donde se cuente con esta información en una escala aceptable para determinar la variabilidad edáfica a nivel intra-lote (Carr *et al.*, 1991). Sin embargo, varios estudios han concluido que el nivel de detalle de los mejores mapas de suelos existentes en la actualidad es insuficiente para ser utilizado como único criterio de delineación de ZM de P (Mallarino y Wittry, 2004). Por lo tanto, se ha propuesto a la CEa del suelo a través de sensores remotos como el EM38 (Geonics Limited, Mississauga, Ontario, Canadá) o de contacto como el Veris 3100 (Veris Technologies, Salina, Kansas, EEUU) como una herramienta estable en términos relativos que sirve para encontrar diferentes patrones de variabilidad en el suelo (Fraisse *et al.*, 2001). Esta técnica está ganando mucha popularidad en varios países, incluida la Argentina, para delinear ZM para P y otras variables (Johnson, 2003; Peralta *et al.*, 2012).

En este trabajo, la ECa fue considerada un criterio eficaz para la zonificación de P sólo en los Sitios 3, 5, 7 y 8 (Figuras 7, 9, 11 y 12 y Tablas 3 y 4). Estos sitios coinciden en presentar extensa variabilidad en la ECa, producto de considerables variaciones texturales a nivel intra-lote. Este resultado podría explicarse por un lado por la mayor acumulación de P en los suelos a medida que disminuye la ECa y aumenta la proporción de partículas gruesas, reduciendo la productividad de los cultivos y la exportación de P del sistema (Sitio 3 y particularmente, Sitio 7). Por otro lado, es frecuente observar el mismo efecto cuando los valores de ECa son muy elevados, asociados a altos contenidos de arcilla y o menor profundidad efectiva del suelo (Sudduth *et al.*, 1995), lo que probablemente también determine menores niveles de exportación de P con los granos y por lo tanto mayores niveles en el suelo (Sitio 5). Conway *et al.* (2017), trabajando en suelos alfisoles de Missouri, EEUU, destacaron la importancia de contemplar la profundidad efectiva del suelo (profundidad del horizonte arcilloso) mediante la ECa obtenida con un sensor remoto para potencialmente mejorar el manejo sitio-específico de P y potasio. Simón *et al.* (2013) informaron que el contenido de P mostró diferencias significativas entre las distintas clases de CEa delimitadas, donde las clases bajas presentaban mayores valores de P asociadas a suelos más livianos y probable menor productividad y por ende menor exportación del nutriente. Sin embargo, en otros sitios con rangos considerables en la ECa, no se observaron claras evidencias de que este criterio de zonificación sea efectivo para delinear zonas de disponibilidad de P, sugiriendo que existen otros factores más importantes que la textura, la profundidad efectiva del suelo y/o el contenido de sales para traccionar los patrones de variabilidad en la fertilidad fosforada del lote. Si bien en los Sitios 6 y 10 no se clasificó esta variable como “eficaz” para la delineación de zonas de P debido a la superposición de las zonas generadas (Tabla 3), pueden observarse patrones de P creciente a medida que aumentó la ECa de las zonas dentro de los Sitios 6 y 10 (Figuras 10 y 14), sugiriendo que existió un componente de la variabilidad de P explicada por la ECa.

El empleo de mapas de rendimiento de cultivos anteriores es otra técnica muy difundida para delinear ZM de P. Para la implementación efectiva de esta metodología, se requieren varios años de mapas de rendimiento del mismo lote para poder determinar en forma certera los patrones de variabilidad espacial. En un estudio de Boydell y McBratney (2002) se concluyó que, para lograr una zona con un patrón de rendimiento estable, se necesitan al menos cinco años de mapas de rendimiento. El uso de varios mapas de rendimiento permite, además de la delineación de ZM para el muestreo de suelos, el cálculo de la extracción de P, luego de realizado el análisis

de la concentración de P en grano. Esta información es de gran utilidad para decidir las dosis de P en cada zona de manejo a fin de mantener niveles óptimos de P en el suelo.

Cuando no se dispone de mapas de rendimiento o no son de buena calidad, las herramientas de teledetección satelital como el NDVI, aportan información útil sobre el nivel de productividad de un lote, aunque no miden directamente la misma. En los Sitios 5, 7 y 9, la zonificación realizada a partir de imágenes NDVI de cultivos anteriores permitió separar áreas de P relativamente contrastantes y medianamente homogéneas dentro de sí (Figuras 9, 11 y 13; y Tablas 3 y 4). Si bien es esperable observar menores niveles de P en el suelo en zonas dentro del lote con mayor capacidad productiva (mayor NDVI) y exportación de P, también es lógico encontrar una gran dispersión de valores de P dentro de cada zona de productividad porque el rendimiento de los cultivos no es la única causa que explica la variabilidad de P a nivel intra-lote. Además, la sensibilidad del NDVI como herramienta de caracterización productiva de un lote varía ampliamente debido a múltiples factores como el cultivo, el momento de la captura de la imagen, las condiciones atmosféricas y características intrínsecas de la campaña, entre otros (Rouse *et al.*, 1973; Girón y Pagani, 2018).

En los Sitios 4, 5, 6 y 10, la elevación del terreno fue útil para separar satisfactoriamente áreas dentro del lote con P contrastante (Figuras 8, 9, 10 y 14 y Tablas 3 y 4). Estos sitios de las provincias de Salta y Entre Ríos presentaron diferencias máximas de elevación superiores a 9 m y en ambos se observó una relación positiva entre la disponibilidad de P de la zona y su elevación promedio, lo que podría explicarse por un gradiente productivo también asociado a la topografía. En ambas provincias es común observar menor productividad vegetal y por lo tanto exportación de nutrientes, en las zonas más elevadas del paisaje, normalmente sujetas a condiciones hídricas menos favorables. Al igual que lo observado para la ECa, otros sitios también presentaron diferencias topográficas considerables (Sitios 9 y 12 y, en mayor medida, Sitio 7) pero no se observó relación entre la elevación del terreno y la disponibilidad de P, sugiriendo que otras variables hayan tenido mayor peso relativo para explicar la fertilidad fosforada del lote. Un gran número de trabajos han sugerido que la topografía y las imágenes satelitales de suelo o cultivos pueden ser parte de la información utilizada para identificar zonas de muestreo, ya que tienden a reflejar diferentes propiedades del suelo y pueden complementar el uso de cartas de suelo (Franzen *et al.*, 1998; Varvel *et al.*, 1999; Kravchencko y Bullock, 2000; Schepers *et al.*, 2000; Franzen y Nanna, 2002).

Mallarino *et al.* (2005) concluyeron que la metodología de muestreo de 1 muestra cada 2 has fracasó en mostrar con éxito la variabilidad de los lotes estudiados y que si bien es muy difícil establecer una única metodología ideal de muestreo que abarque todas las regiones productivas, tipos de suelos y casos; el muestreo en grillas mientras más intensivo se realice, mejor refleja la variabilidad del lote. Los autores, remarcan la importancia de analizar los costos de la práctica y los retornos económicos obtenidos. En Argentina, Pagani y Rompani (2022) demostraron a través de una importante cantidad de casos de la Región Pampeana que la fertilización variable en ambientes delimitados bajo el muestreo con una intensidad de 1,6 has se obtuvo una rentabilidad significativamente mayor que fertilizar con dosis uniformes los cultivos de maíz, trigo y soja. En EEUU el tema fue debidamente estudiado con la salvedad que las dosis uniformes en dicho país suelen ser en promedio mucho mayores a las utilizadas en Argentina y, por ende, los análisis de fertilización variable no suelen traer aumentos en el rendimiento sino ahorro o uso eficiente de los fertilizantes (Wittry y Mallarino, 2004). Otro punto importante a la hora de evaluar la conveniencia del muestreo intensivo en grillas y la debida delimitación de ZM se relaciona con la aplicación de dosis adecuadas en lo relativo a la sobredosificación. Si bien la sobredosificación no parece ser un problema ampliamente difundido en Argentina, se han encontrado lotes con alta variabilidad que en algunas zonas tienen altos valores de P que están siendo de alguna manera sobre dosificados. La sobredosificación tiene un impacto ambiental por pérdidas también

para nutrientes no móviles y su correcta dosificación implica un ahorro en costos (Wittry y Mallarino, 2004; Mallarino, 2006).

Tabla 3. Intervalos de confianza (IC, 90%) para los promedios de fósforo (P) en el suelo de cada zona delineada según los cuatro criterios evaluados.

Sitio	Zona	Criterio de zonificación							
		Grilla		Elevación		ECa		NDVI	
		IC inferior	IC superior	IC inferior	IC superior	IC inferior	IC superior	IC inferior	IC superior
----- mg kg ⁻¹ -----									
1	A	9.5	18.5	53.2	60.1	49.1	54.4	50.0	56.1
	B	54.0	56.0	52.8	59.7	53.6	56.8	52.0	56.8
	C			52.6	55.4	50.3	56.4	54.0	56.3
2	A	5.7	6.8	14.3	20.1	11.8	19.6	10.9	30.6
	B	7.1	13.8	12.3	22.6	11.9	27.2	7.0	31.1
	C	17.4	26.0			13.6	27.7	12.6	17.6
	D	25.9	28.1			9.4	14.8	19.2	34.9
		42.1	57.4			13.2	16.3		
3	A	17.1	18.9	23.1	31.8	23.9	34.2	8.9	40.1
	B	23.5	25.6	20.3	26.8	21.5	27.1	14.0	44.5
	C	32.3	50.2			17.1	21.5	18.3	25.7
	D							20.3	26.0
	E							21.5	31.5
4	A	16.4	20.3	25.6	38.4	3.1	38.9	22.4	49.6
	B	24.1	26.8	19.7	25.8			23.2	28.8
	C	31.2	42.8	20.0	27.0	16.8	31.5	18.5	24.0
						22.6	32.3		
					22.8	31.9			
5	A	4.8	5.7	16.7	19.9	10.8	15.2	13.9	17.5
	B	8.7	9.7	12.5	16.2	7.4	10.4	17.3	21.6
	C	17.7	20.0	16.3	24.3	16.0	20.7	15.7	18.7
		28.6	30.6	16.8	22.5	21.3	24.0		
		36.9	41.4	22.5	28.3	14.3	22.7		
6	A	47.1	52.1	47.1	55.7	53.4	64.9	56.0	63.7
	B	72.6	80.0	60.2	70.3	55.3	64.6	54.6	66.4
				57.8	72.1	50.4	60.2		
						59.4	79.5		
					85.5	94.5			
7	A	5.3	6.5	7.1	15.3	7.4	33.0	8,3	13.5
	B	8.6	10.0	7.8	9.5	8.5	10.1	6.6	7.9
		0.8	42.5	6.0	8.7	6.5	8.3		
					6.2	7.9			
					4.7	5.8			

8	A	-8.1	41.1	29.0	39.8	23.4	30.3	32.5	40.4
	B	13.1	16.7	30.0	42.7	30.3	46.8	23.9	33.2
		21.7	28.0	38.9	48.6	40.4	53.2		
		42.3	48.9			49.2	60.8		
					49.7	64.7			
9	A	15.3	18.4	26.6	34.1	23.0	30.5	28.3	34.6
	B	25.6	27.9	25.6	30.4	24.8	28.5	24.7	27.7
		37.1	44.5	24.2	29.0	26.9	32.9		
				21.0	27.6				
10	A	16.3	17.4	6.5	19.2	6.2	21.8	14.8	29.5
	B	25.1	60.9	8.2	12.2	7.3	9.8	10.7	20.2
		3.1	6.9	15.8	25.7	9.5	16.2	9.0	15.3
		9.0	11.0			6.7	24.6		
		24.2	34.4			14.5	24.7		
					-21.1	77.1			
11	A	3.8	5.8	5.1	8.2	-3.2	10.2	4.8	6.9
	B	9.7	11.0	4.6	5.7	4.8	7.2	4.8	6.2
						4.3	5.3		
						4.9	9.9		
12	A	19.6	22.9	41.4	48.8	44.0	48.3	42.4	51.9
	B	46.8	50.4	46.5	52.1	42.5	60.8	34.8	57.9
		C			38.7	47.9			38.5
13	A	15.6	18.4	23.1	28.2	23.8	33.7	20.4	64.9
	B	21.9	24.6	22.7	29.4	21.7	27.3	20.3	24.8
		32.4	40.4			20.3	28.7	22.9	29.6
						19.3	40.0	22.6	28.1
						19.5	26.5		

Tabla 4. Frecuencia de lotes donde la variabilidad de fosforo (P) entre las zonas delineadas según cada criterio de zonificación fue estadísticamente ($P < 0.1$) mayor a dicha variabilidad dentro de cada zona.

Sitio	Número de lotes			
	Criterio de zonificación			
	Grilla	Elevación	ECa	NDVI
1	1			
2	1			
3	1		1	
4	1	1		
5	1	1	1	1
6	1	1		
7	1		1	1
8	1		1	
9	1			1
10	1	1		
11	1			
12	1			
13	1			
Suma	13	4	4	3
%	100	31	31	23

La mayoría de los estudios que han comparado diferentes esquemas de muestreo para P concluyen en que el muestreo en grilla presenta ventajas sobre el muestreo en zona para caracterizar la variabilidad de P en el suelo y la respuesta por parte de los cultivos a la fertilización fosforada (Sawchik y Mallarino, 2007). Mallarino (2006) demuestra que la metodología de muestreo en grilla resulta frecuentemente la más precisa, aunque podría no justificarse el 100% de los casos, principalmente en lotes con muy bajos (menos de 17 ppm) o altos (más de 35 ppm) niveles de P. En ciertas regiones con menor historia de fertilización, los estudios realizados sugieren que sería posible lograr una adecuada caracterización del nivel de P disponible y de la probabilidad y magnitud de la respuesta a la aplicación de P, mediante el muestreo en zona, que resulta naturalmente menos intensivo y más económico. Con respecto al costo del muestreo en grillas, que suele ser el principal cuestionamiento que recibe la práctica, es importante destacar que si bien nace como un metodología para entender la variabilidad de P del lote y está ampliamente aceptado que a mayor variabilidad, más se justifica el muestreo intensivo y mayor es el retorno económico de la práctica (Havlin y Heiniger, 2009) ya sea por incrementos en la producción como por ahorro o no de insumos (Mills *et al.*, 2021); la información obtenida es también de utilidad para realizar fertilización variable de nitrógeno y siembra variable de los cultivos. En el presente trabajo no se presentan datos o análisis económicos en lo relacionado a P pero sería necesario realizarlo para complementar la evaluación sobre las metodologías de zonificación y muestreo.

CONCLUSIONES

Se recopilaron evidencias para rechazar la hipótesis planteada, ya que los resultados de esta simulación muestran que la delineación de ZM de P en base al muestreo de suelo en grilla fue el criterio más eficaz para capturar la variabilidad espacial de P a nivel intra-lote en los sitios evaluados. Esta metodología permitió delinear zonas de P que fueron más contrastantes entre sí y más homogéneas dentro de sí, en relación con los demás criterios de zonificación. La ECa, la elevación y el NDVI fueron criterios satisfactorios como herramienta de zonificación de P sólo en una baja proporción de los casos (entre 23 y 31%), particularmente en aquellos lotes con mayor variabilidad topográfica y textural, que normalmente están sujetos a una marcada heterogeneidad en la productividad de los cultivos, lo que genera un balance de P contrastante en lotes históricamente manejados con fertilización uniforme. En Argentina, será necesario implementar estas prácticas de muestreo de suelo intensivo en una mayor cantidad de zonas agroecológicas con distinta génesis de suelos e historial agrícola. Un estudio de este tipo, separando cada zona agroecológica, permitirá un mejor entendimiento de los patrones de distribución espacial de la fertilidad fosforada a nivel intra lote para poder, eventualmente, recomendar menores densidades de muestreo cuando sea posible con la seguridad de no comprometer la precisión y eficacia en las prácticas de fertilización sitio-específica.

AGRADECIMIENTOS:

A la Dra. Ing. Agr. Mónica Rodríguez por guiarme en las primeras etapas del trabajo, a Msc. Ing. Agr. Juan Martín Rompani por su ayuda en el uso de herramientas de edición y a los productores y asesores que colaboraron en la recolección de datos e información relevante para los resultados.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, F.H. (1995): Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crops Res.* 41:1-12.
- Balboa, G.R. (2014). Comparación agronómica de dos criterios de dosificación de nitrógeno en maíz en la llanura bien drenada del Centro y Sur de la Provincia de Córdoba. Tesis. Universidad Nacional de Río Cuarto. p 12-68
- Basso, B., Fiorentino, C., Cammarano, D., Cafiero, G. y Dardanelli, J. (2012). Analysis of rainfall distribution on spatial and temporal patterns of wheat yield in Mediterranean environment. *Eur. J. Agron* 41 (2012) 52– 65.
- Bermúdez, M. y Mallarino A.P. (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.
- Böem F. y Marasas P. (2005). “Pequeñas zonas con altas concentraciones de fósforo causan grandes errores en la determinación de fósforo disponible a nivel de lote”. *Informaciones*

- Agronómicas de Hispanoamérica No. 25, marzo 2005 (9-11). Rescatado de www.ipni.net/publication.
- Boydell, B., y McBratney A.B. (2002). Identifying potential within-field management zones from cotton yield estimates. *Precision Agric.* 3:9–23.
- Carr, P.M., Carlson G.R., Jacobsen J.S., Nielsen G.A. y Slogles E.O. (1991). Farming soils, not fields: A strategy for increasing fertilizer profitability. *J. Prod. Agric.* 4:57–61.
- Carretero R., Marasas P., Souza E. y Rocha A. (2015). “Conceptos de utilidad para lograr un correcto muestreo de suelos “. Archivo Agronómico número 15. Facultad de Agronomía Universidad de Buenos Aires.
- Ciapitti I. y García F. (2010). Requerimientos Nutricionales. Absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. Cereales, oleaginosos e industriales. Rescatado de www.profertil.com.ar
- Conway, L.S., Yost M.A., Kitchen N.R., y Sudduth K.A.. (2017). Using topsoil thickness to improve site-specific phosphorus and potassium management on claypan soil. *Agron. J.* 109(5): 2291-2301.
- Doerge, T.A. (1999). Management Zone Concepts. S.I: Potash & Phosphate Institute. Site-Specific Management Guidelines 2, 4 p.
- Echeverría H. y García F. (2014). “Fertilidad de suelos y fertilización de Cultivos”. Buenos Aires: INTA Ediciones. Rescatado de <https://koha.unlpam.edu.ar/>
- Espósito, P.G. (2013). Análisis de la variabilidad espacio-temporal de la respuesta al nitrógeno en maíz mediante un modelo econométrico mixto especial (MEME). Tesis. Universidad Nacional de Córdoba. p 13-87.
- Fraisse, C.W., Sudduth K.A. y Kitchen N.R. (2001). Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. *Trans. of the ASAE.* 44:155-166.
- Ferguson, R.B., Lark, R.M. y Slater, G.P. (2003). Approaches to management zone definition for use of nitrification inhibitors. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 937-947.
- Frank, K., Beegle D. y Denning J. (1998). Phosphorus. p. 21–29. En J.L. Brown (ed.) Recommended chemical soil test procedures for the North Central region. North Central Regional Publ. 221 (rev.). Publ. SB 1001.
- Franzen, D.W., Cihacek L.J., Hofman V.L. y Swenson L.J. (1998). Topography-based sampling compared to grid sampling in the Northern Great Plains. *J. Prod. Agric.* 11:364-370.
- Franzen, D.W. y Nanna T.N. (2002). Management zone delineation methods. In P.C. Robert, R.H. Rust, and W.E. Larson (ed.). In P.C. Robert, R.H. Rust, and W.E. Larson (ed.). *Proc. Sixth Int.*

- Conf. on Precision Agriculture. Minneapolis, MN. July 14-17, 2002. CD ROM. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI.
- Franzen, D.W. y Peck, T.R. (1993) Hoelt (ed.) Soil sampling for variable rate fertilization. *Proc. Illinois Fert. Conf.* Springfield, IL, 25–27 Jan 1993. Urbana-Champaign, IL, Univ. of Illinois, 81–91.
- Franzen, D.W. y T.R. Peck. (1995). Field soil sampling density for variable rate fertilization. *J. Prod. Agric.* 8:568-574.
- Girón P. y Pagani A. (2018). Evaluación del NDVI para delinear zonas de manejo de nitrógeno para el cultivo de maíz. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 15-18 mayo, San Miguel de Tucumán, Tucumán. Asociación Argentina de la Ciencia del suelo. pp 154-160.
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press.
- Gutiérrez Böem F.H, Cabello M.J. y Quintero C., Rubio G. (2010). Retención de fósforo en suelos de la Región Pampeana: I. Al y Fe amorfo. Recogido de: www.fertilizar.org.ar
- Havlin J. L. y Heiniger R. W. (2009). "A variable-rate decision support tool". *Precision Agriculture* 10.4 (2009): 356-369.
- Jamison, V.C., Smith, D.D. y Thornton, J.F. (1968). Soil and water research on claypan soil. USDA-ARS Technical Bulletin 1379, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- Jaynes, D.B. (1996). Improved soil mapping using electromagnetic induction surveys. p. 169–179. In *Proc. 3rd Int. Conf. on Site-Specific Management for Agricultural Systems*. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- Johnson, C.K., Mortensen D.A., Wienhold B.J., Shanahan J.F. y Doran J.W. (2003). Site-Specific Management Zones Based on Soil Electrical Conductivity in a Semiarid Cropping System. *Agron. J.* 95:303–315.
- Kachanoski, R.G., Gregorich, E.G. y Van Wessen, I.J. (1988). Estimating spatial variations of soil water content using noncontacting electromagnetic inductive methods. *Can. J. Soil Sci.* 68:715–722.
- Kaspar, T.C., Colvin, T.S., Jaynes, D.B., Karlen, D.L., James, D.E., Meek, D.W., Pulido, D. y Butler, H. (2003). Relationship Between Six Years of Corn Yields and Terrain Attributes. *Precis. Agric.* 4:87-101.
- Kravchenko, A.N. y Bullock D.G. (2000). Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agron. J.* 92:75-83.
- Lund, D.L., Colin, P.E., Christy, D. y Drummond, P.E. (1999). Applying soil electrical conductivity technology to precision agriculture. EN: Robert, P.C., Rust, R.H., Larson, W.E. (Ed). *Precision Agriculture*. Madison: ASA-CSSA-SSSA. pp.1089-1100.

- Macnack N., Chim B. K., Amedy B. y Arnall B. (2017). "Fertilization Based on Sufficiency, Build-up and Maintenance Concept". Oklahoma Cooperative Extension Service PSS-2266. Recuperado de: <https://extension.okstate.edu>.
- Mallarino A. y Wittry D. (2004). Efficacy of Grid and Zone Soil Sampling Approaches for Site-Specific Assessment of Phosphorus, Potassium, pH, and Organic Matter. *Precision Agriculture*; 5; 131-144.
- Mallarino A. (2006). "Variable-rate application for phosphorus and potassium: Impacts on yield and nutrient management. Integrated Crop Management Conference, Iowa State University 219, 2006. Rescatado de www.iastate.edu
- Mallarino A., Beegle D.B. y Joern B.C. (2005). "Soil Sampling Methods for Phosphorus-Spatial Concerns". A SERA-17 Position Paper. Rescatado de: <https://sera17.wordpress.ncsu.edu/publications>
- McBride, R.A., Gordon, A.M., Shrive S.C. (1990). Estimating forest soil quality from terrain measurements of apparent electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:290–293.
- McCutcheon, M.C., Farahani, H.J., Stednick, J.D., Buchleiter, G.W. y Green, T.R. (2006). Effect of Soil Water on Apparent Soil Electrical Conductivity and Texture Relationships in a Dryland Field. *Biosyst Eng.* 94:19-32.
- Mills B. E., Wade Brorsen B. y Arnal D. B. (2021). "Using Grid Soil Sampling to Determine Profit-Maximizing Phosphorus Application Rates in Wheat". *Journal of Agricultural and Resource Economics* 46(2):269-286 2021.
- Murdock L. y Howe P. (1997). "Profitability of Variable Rate Fertilization on Kentucky Soil (A Theoretical Analysis). Vol. 18, No.10.1997. Rescatado de: <https://www.uky.edu/Ag/Agronomy/Extension>
- Pagani A. y Rompani J. (2022). "Rentabilidad estimada del manejo variable de fósforo basado en un muestreo de suelo en grilla". Segundo Congreso Latinoamericano de Agricultura de Precisión (CLAP 2022). Material compartido por el autor.
- Pautasso, J.M., Albarenque, S., Schulz, G., Kemerer, A., Bedendo, D. y Melchiori, R. (2010). Delimitación de zonas de manejo mediante variables de suelo y validación para maíz. EN: INTA, EEA Manfredi. 9º Curso internacional de Agricultura de precisión, 4º Expo de maquinarias precisas, 2º Gira tecnológica de precisión. Manfredi: Ediciones INTA. pp.207-214.
- Peralta, N.R., Costa J.J., Balzarini M. y Angelini H. (2012). Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the southeastern pampas. *Can. J. Soil Sci.* 93: 1-14.

- Pierzynski, G.M., Mcdowell, R.W. y Sims, J.T. (2005). "Chemistry, cycling, and potential moment of inorganic phosphorus in soils". In: Phosphorus: Agriculture and the Environment (JT Sims, AN Sharpley, eds), American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Inc., Madison, 2005, WI, pp 53-86
- Pierce, F.J., y Nowak P. (1999). Aspects of precision agriculture. *Adv. Agron.* 67:1–85.
- Rouse, Jr J.W., Haas, R., Schell, J. y Deering, D. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS Symposium*:309–317 p.
- Rubio G, Álvarez R. y Steinbach HS. (2021). "Fósforo del suelo en Agroecosistemas". Álvarez, *Fertilidad de Suelos y Fertilización en la Región Pampeana*, Editorial Facultad de Agronomía.
- Ruffo, M. L., Bollero, G. A., Bullock, D. S. y Bullock, D. G. (2006). Site-specific production functions for variable rate corn nitrogen fertilization. *Precision Agriculture*, 7(5): 327–342. <https://doi.org/10.1007/s11119-006-9016-7>
- Sainz Rozas, H., Echeverría H.E., y Angelini H.P (2011). Fósforo extractable en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extra pampeana de Argentina. *Informaciones Agronómicas*. 4:14-18. Rescatado de: www.ipni.net/publication
- Sawchik, J., y Mallarino A.P. (2007). Evaluation of zone soil sampling approaches for phosphorus and potassium based on corn and soybean response to fertilization. *Agron. J.* 99:1564–1578.
- Sawyer, J.E., Mallarino A.P., Killorn R., y Barnhart S. K. (2002). General guide for crop nutrient recommendation in Iowa. *Publ. Pm-1688 (Rev.)*. Iowa State Univ. Ext., Ames.
- Schepers, J.S., Schlemmer M.R. y Ferguson R.B. (2000). Site-specific considerations for managing phosphorus. *J. Environ. Qual.* 29:125-130.
- Simon M., Peralta N. y Costa J. L. (2013). "Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades de suelo y nutrientes". *Ciencia del Suelo* volumen 31, número 1. Rescatado de www.scielo.org.ar
- Sucunza F., Gutiérrez Böem F., García F., Boxler M. y Rubio G. (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.
- Sudduth K.A., Kitchen, N.R., Hughes, D.F. y Drummond, S.T. (1995). Electromagnetic induction sensing as an indicator of productivity on claypan soils. In: Robert, P.C. et al. (Eds.), *Proc. Int. Conf. on Site- Specific Management for Agricultural Systems*, 2nd, Minneapolis, MN. 27–30 March 1994. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- Varvel, G.E., Schlemmer M.R. y Schepers J.S. (1999). Relationship between spectral data from an aerial image and soil organic matter and phosphorus levels. *Precision Agric.* 1:291-300.

- Vázquez M. E. (2002). "Balance y Fertilidad Fosforada en suelos productivos de la Región Pampeana". *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* N 16. Rescatado de <https://fertilizar.org.ar>
- Wittry D. y Mallarino A. (2004). "Comparison of Uniform-and Variable-Rate Phosphorus Fertilization for Corn-Soybean Rotation". *Agronomy Journal* 96:26-33 Año 2004.
- Wollenhaupt, N.C., Wolkowski R.P. y Clayton M.K. (1994). Mapping soil test phosphorus and potassium for variable-rate fertilizer application. *J. Prod. Agric.* 7:441–448.