

Manejo sitio-específico de nutrientes: experiencias de 12 años de aprendizaje

► ► **Pagani. A.**

Clarion, 9 de Julio, Bs. As.

✉ apagani@precisionclarion.com

>. INTRODUCCIÓN

El manejo sitio-específico de nutrientes puede definirse como una tecnología de procesos que busca un mejor entendimiento de los factores que determinan la variabilidad espacial de la respuesta de los cultivos a la fertilización dentro de un lote de producción y lo lleva a la práctica a través de la aplicación de nutrientes y enmiendas con dosis variable. Su objetivo principal es lograr que los cultivos maximicen la eficiencia en el uso de los recursos (incluidos los nutrientes), incrementando la rentabilidad de la producción y minimizando su impacto ambiental. Generalmente, involucra un esfuerzo interdisciplinario combinando conocimiento agronómico básico con herramientas tecnológicas como sistemas de geo posicionamiento global (GPS), sistemas de información geográfica (GIS), monitores de rendimiento, sensoramiento remoto y de contacto, y maquinaria equipada con capacidad de realizar dosificación variable de insumos. En el último tiempo también se han incorporado aportes de tecnologías más sofisticadas de aprendizaje automático (*“machine learning”*) y otros tipos de inteligencia artificial.

Si bien la potencialidad de esta tecnología ha demostrado ser muy grande, su incorporación masiva a nivel nacional ha tropezado con varios obstáculos de diferente índole. Algunos de ellos se han ido paulatinamente solucionando en los últimos años, como la madurez de la tecnología en general, la capacitación de agrónomos y operarios y el soporte técnico por parte de las empresas proveedoras de tecnología. Otras barreras que han retrasado la adopción de la práctica todavía representan un desafío, como disponer de recomendaciones zonales de fertilización con el nivel de precisión y resolución espacial que la tecnología demanda y la dificultad para evaluar su eficacia en relación a planteos de producción tradicionales de manejo uniforme.

En este resumen se presentan algunas experiencias de investigación y producción donde se muestra como el manejo sitio-específico de nutrientes ha logrado mejorar los índices productivos, económicos y (de alguna manera) ambientales de la agricultura argentina, respecto a planteos de manejo uniforme que ignoran la variabilidad espacial de los lotes de producción.

>. CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL

El término caracterización ambiental se emplea para referirse al conjunto de relevamientos, mediciones y análisis sitio-específicos para estudiar como atributos edáficos, topográficos y productivos se distribuyen dentro de un campo (van Alphen y Stoorvogel, 2000). Existen numerosas herramientas de caracterización ambiental que varían en su origen, nivel de complejidad y resolución espacial. Algunas se

enfocan en determinar las propiedades del suelo y las características del paisaje mediante diferentes aproximaciones, y otras se centran en el cultivo, estimando su rendimiento y/o vigor de la cobertura vegetal.

En la Figura 1 se presenta un mapa de Argentina y Uruguay mostrando la ubicación geográfica de 672 lotes de producción que fueron intensivamente caracterizados entre 2013 y 2024 mediante un relevamiento topográfico realizado con un GPS de alta precisión, un mapa de conductividad eléctrica aparente (ECa, como indicador de variabilidad espacial en la textura del suelo y la salinidad/alcalinidad) a través de un sensor de contacto (Veris 3100), un muestreo de suelo en grilla para analizar determinados nutrientes y propiedades edáficas (1 muestra compuesta cada 1 o 1.6 has) y un análisis de productividad agrícola mediante el estudio de múltiples mapas de rendimiento y/o índices de vegetación provenientes de imágenes satelitales de varias campañas. Un ejemplo de esta caracterización ambiental intensiva para un lote de 9 de Julio, Bs. As., se muestra en la Figura 2.

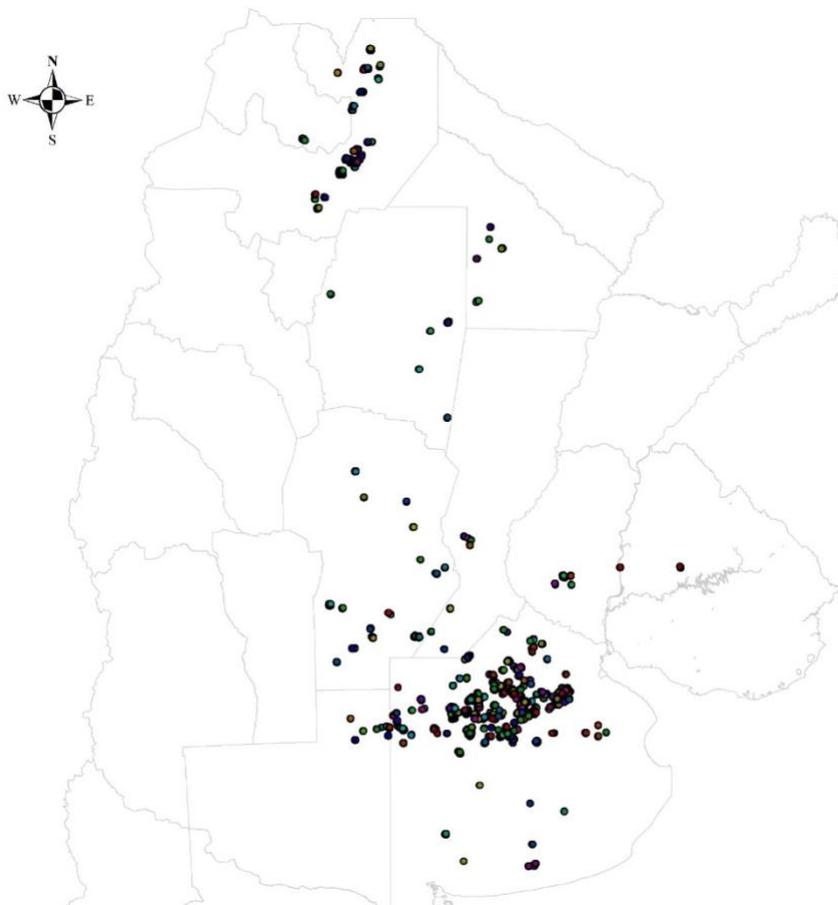


Figura 1. Ubicación de los 672 lotes de producción caracterizados intensivamente durante el período 2013-2024.

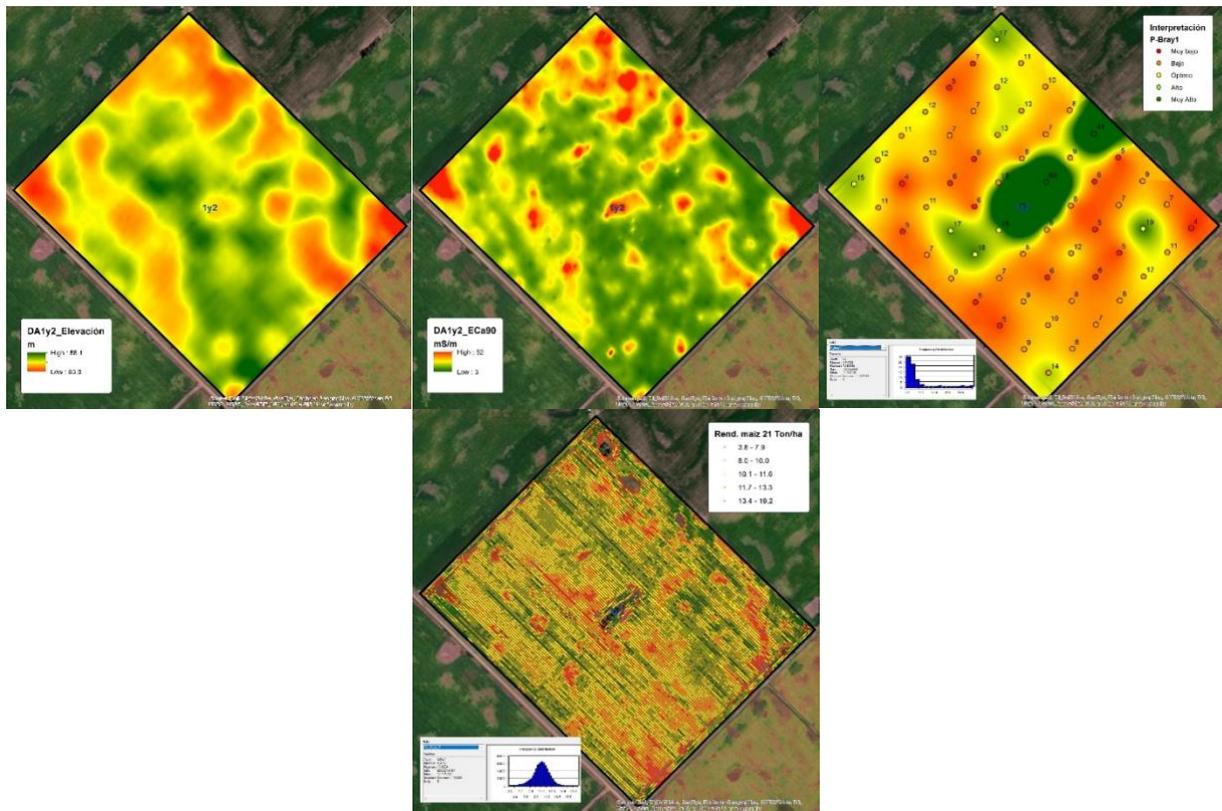


Figura 2. Ejemplo de uno de los lotes caracterizados intensivamente, mostrando el mapa interpolado de elevación del terreno, conductividad eléctrica aparente (ECa90), muestreo de suelo en grilla y análisis de fósforo (P-Bray1) y un mapa de rendimiento de maíz de la campaña 20/21 en 9 de Julio, Bs. As.

Para esta amplia base de datos se exploraron relaciones funcionales a nivel intra-lote entre los patrones de productividad observados (mapas de rendimiento e índices de vegetación) y las variables provenientes del relevamiento realizado, a fin de estudiar el nivel de variabilidad espacial encontrado en cada región y lograr un mejor entendimiento de las principales variables que determinan la productividad de los cultivos y, eventualmente, su respuesta a la fertilización. A modo de ejemplo se muestra la relación de la productividad con a) la elevación del terreno y b) la ECa en cinco lotes de producción del Centro-Oeste Bonaerense (Figura 3) que contaron con al menos cuatro años de mapas de rendimiento de maíz, trigo, soja y cebada durante los años 2013 a 2021. La relación entre el rendimiento y la topografía varió notablemente entre lotes dependiendo del cultivo, del año y del rango de elevación explorado. Si bien no en todos los casos, en general, se observó que la relación preponderante obedeció a una forma de campana, con un rango de elevación intermedio coincidente con los rendimientos más altos, por encima y por debajo del cual se observan disminuciones en la productividad, por razones presumiblemente diferentes. En el rango de mayor elevación, su relación con rendimiento fue negativa debido principalmente a la menor disponibilidad hídrica del suelo a medida que aumenta la elevación del terreno, en particular en las campañas hídricamente más restrictivas (datos no mostrados) y especialmente para el cultivo de maíz por su mayor sensibilidad. Esta relación se invirtió en las áreas de menor elevación, particularmente en las campañas con excesos hídricos (datos no mostrados), donde los rendimientos tendieron a bajar a medida que disminuyó la elevación del terreno (áreas sujetas a encharcamiento y anoxia radical). Por su parte, la ECa fue generalmente un indicador más sensible y consistente entre sitios para explicar patrones de rendimiento a nivel intra-lote. Al igual que para la elevación y en mayor medida

para las gramíneas, se observó que la relación entre el rendimiento de los cultivos y la ECa presentó una forma de tipo óptima, identificándose un rango de ECa (de magnitud variable) consistente con máximos valores de productividad por encima y por debajo del cual el rendimiento disminuyó. Esta tasa de disminución fue mayor para maíz, intermedia para trigo y cebada y menor para soja, y tendió a ser más abrupta en campañas meteorológicamente más extremas (datos no mostrados). En algunos casos, especialmente para el cultivo de soja y cultivos de invierno, no se observaron relaciones consistentes entre el rendimiento y la elevación o la ECa, destacando la diferente sensibilidad de los cultivos ante la heterogeneidad de los lotes y como esto interacciona con cada campaña.

Este ejemplo con sólo cuatro localidades pretende resaltar la importancia de entender cuantitativamente la relación (si existe) entre la variabilidad edafotopográfica de los lotes y la productividad de los cultivos como un primer paso para la delimitación de zonas relativamente homogéneas dentro del lote, que se manejaran de forma diferencial, siempre y cuando el nivel de variabilidad y el cultivo lo justifiquen (Whelan y Taylor, 2013). Desde los inicios de la agricultura de precisión, el concepto de zonas de manejo (ZM) ha sido ampliamente aplicado (Whelan y Taylor, 2013). En este enfoque, la variabilidad intra-lote se agrupa en zonas con características similares, que se supone que también comparten la misma respuesta a los insumos y, por lo tanto, los mismos requerimientos de manejo. Si se combinan con experimentos a campo, estas ZM pueden ayudar a comprender las respuestas a nivel intra-lote, y si existe interacción entre tratamientos y zonas, habrá oportunidad para desarrollar funciones de respuesta específicas para cada zona (Bishop y Lark, 2006; Piepho et al., 2011). Si bien el enfoque de ZM es intuitivo y directo, su supuesto principal (la homogeneidad de las respuestas dentro de las ZM y la heterogeneidad entre ellas) no siempre se cumple ni se verifica. Además, para aumentar la resolución espacial con la que se puede manejar un cultivo, se requiere información sobre cómo el rendimiento responde a diferentes tratamientos y cómo esas respuestas varían en el espacio (Bullock y Bullock, 1994).

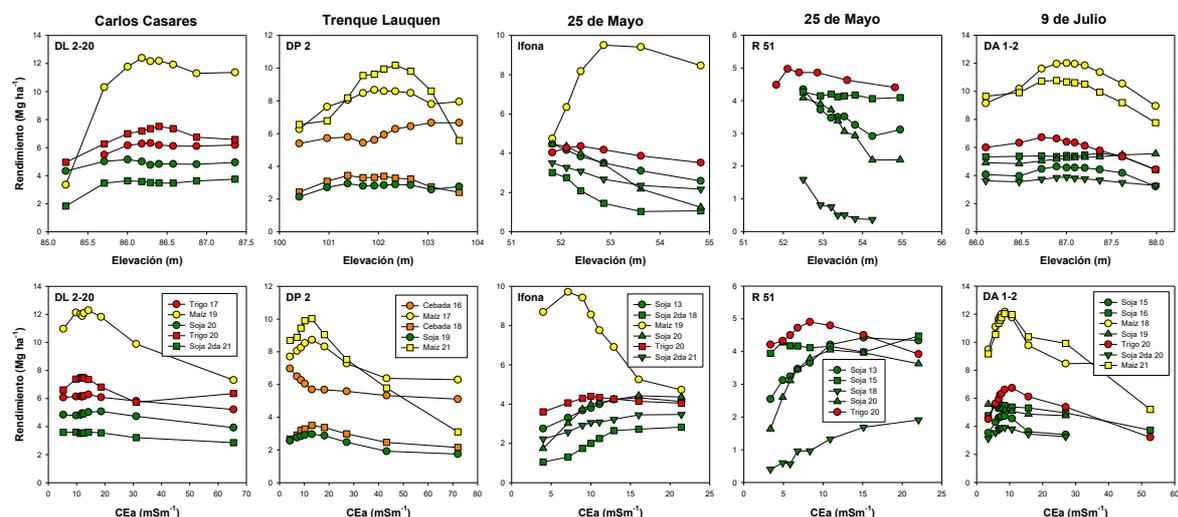


Figura 3. Rendimiento de maíz, trigo, cebada y soja en función de la elevación del terreno y la conductividad eléctrica aparente (ECa) dentro de lotes del Centro Oeste Bonaerense (Pagani et al., 2022).

>. INVESTIGACIÓN EN CAMPOS DE PRODUCTORES

La investigación en campo de productores u *“on-farm research/experimentation”* ha ganado popularidad en los últimos años con la mayor adopción de tecnologías de agricultura de precisión y se presenta como una herramienta de gran potencialidad para evaluar el impacto de numerosas prácticas agrícolas (incluida la nutrición de cultivos) y su interacción con el ambiente (Lacoste et al., 2021). Existen diferentes metodologías y diseños experimentales que han sido propuestos para realizar investigación en lotes de producción. Los ensayos en microparcels (Figura 3a) instalados en áreas estratégicas del lote tienen la ventaja de la alta precisión y confiabilidad de los resultados, pero generalmente involucran trabajos manuales que los tornan de alto costo, gran laboriosidad y dificultad para escalar. Son particularmente útiles para responder preguntas puntuales cuando se requiere de alta precisión en los resultados en situaciones determinadas.

Los ensayos en franjas (Figura 3b) cosechados con máquinas equipadas con monitor de rendimiento (Scharf et al., 2005; Pagani y Mallarino, 2015) tienen la gran ventaja de la mecanización, y al cubrir un área más extensa, pueden explorar un mayor rango de variabilidad. Generalmente se los utiliza cuando se quiere responder a preguntas de tipo categórico (tratamientos si/no o A/B) porque proporcionan un entendimiento “más continuo” de como la variabilidad espacial de los lotes interacciona con los tratamientos evaluados. Sin embargo, esto ocurre muchas veces a expensas de cierta pérdida de precisión de los resultados generados (Piepho et al., 2011), especialmente cuando se emplean franjas de gran ancho o más de dos o tres tratamientos. Estadísticamente, también presentan algunas desventajas con respecto a la repetición, aleatorización y al balance de los tratamientos, por lo que se requiere de procedimientos de mayor complejidad para poder realizar comparaciones en forma insesgada (Trevisan et al., 2020).

Los ensayos en tablero de ajedrez o *“checkerboard design”* (Figura 3cdef) han ganado popularidad en los últimos años debido a sus ventajas logísticas y estadísticas (Kindred et al., 2015; Bullock et al., 2019). Estos protocolos requieren de maquinaria capaz de realizar dosificación variable con alta precisión y de la generación de un mapa *“as-applied”* de siembra o fertilización de las dosis realmente aplicadas. También necesitan de cosechadoras con monitor de rendimiento, por lo que permiten gran escalabilidad en la generación de información. Si bien la dimensión de las celdas debe adaptarse a la maquinaria disponible, su tamaño relativamente pequeño aprovecha algunas de las ventajas de las microparcels referidas a la precisión (Alesso et al., 2021), pero se benefician de la mecanización completa. Son particularmente útiles para experimentos que requieren dosis crecientes de insumos y su interacción con el ambiente, para poder ajustar funciones de producción continuas como las curvas de respuesta a la aplicación de un nutriente.

Independientemente del protocolo experimental adoptado, la posibilidad de realizar investigación a campo ha abierto un gran abanico de nuevas posibilidades para la evaluación de muchas prácticas de manejo empleadas por un productor e incluso para la generación de información inexistente hasta el momento a una escala a la cual sería impracticable haciendo investigación clásica en estaciones experimentales (Panten et al., 2010). Si se respetan los principios básicos del diseño experimental (Alesso et al., 2019), esta herramienta se presenta como un gran aliado para potenciar y retroalimentar el manejo sitio-específico de nutrientes. En las siguientes secciones se presentan ejemplos concretos del uso de esta tecnología.

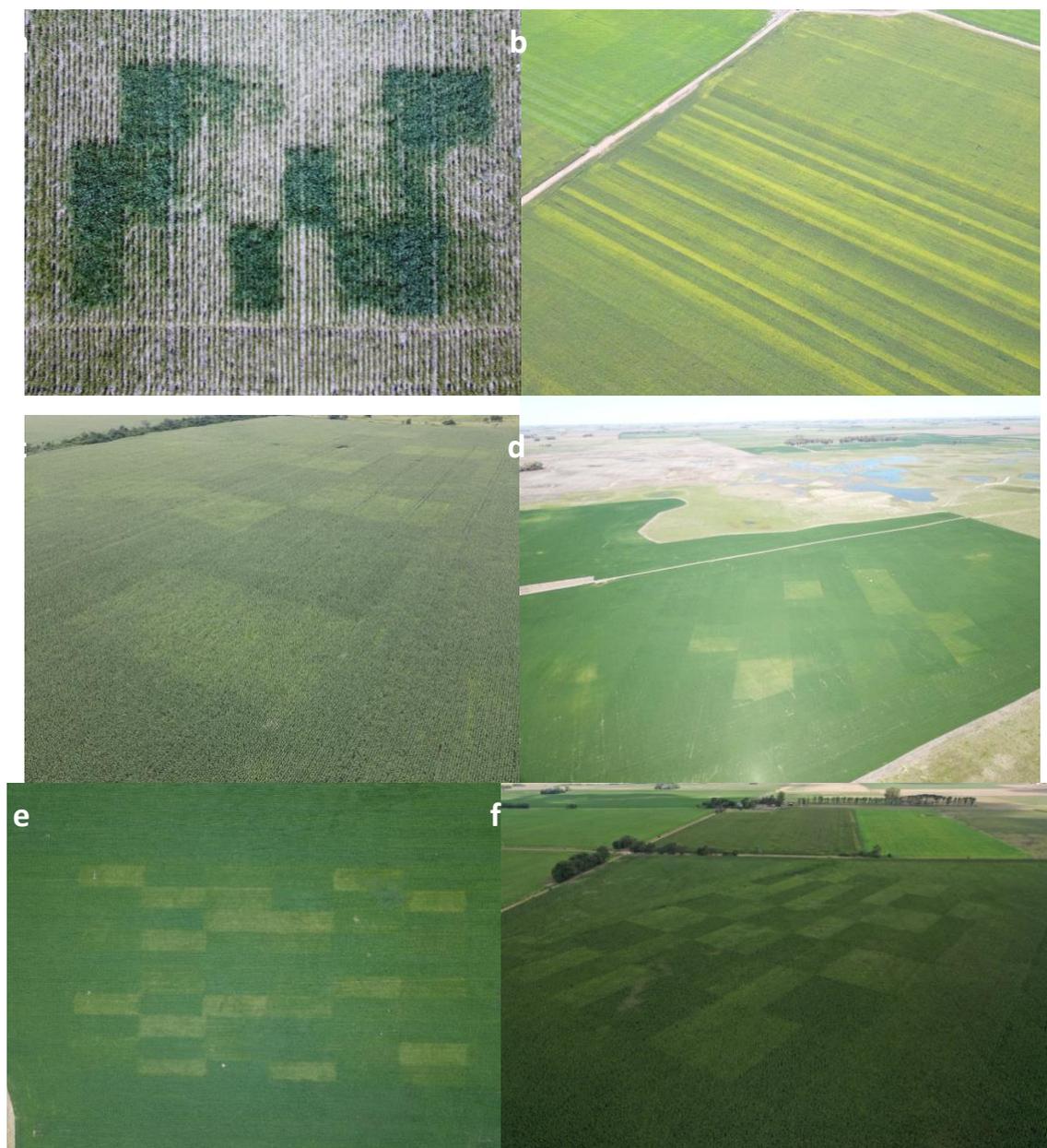


Figura 3. Fotos aéreas de diferentes diseños experimentales de investigación en campos de productores para el manejo de nutrientes: microparcelas (a, 9 de Julio, Bs. As.), franjas repetidas (b, Gral. Villegas, Bs. As.) y tablero de ajedrez (*“checkerboard design”*, c, Las Lajitas, Salta, d, C. Casares, Bs. As., e, 9 de Julio, Bs. As. y f, Arrecifes, Bs. As.).

> MANEJO VARIABLE DE FÓSFORO

La fertilización fosforada es una práctica muy difundida pero su implementación tradicional con dosis uniforme puede derivar en sub o sobre dosificación si el lote presenta variabilidad en la disponibilidad de este nutriente en el suelo (Bullock et al., 1994). El muestreo y análisis de suelo es la metodología de diagnóstico más difundida para determinar las necesidades de fertilización fosforada para los cultivos extensivos. Una asunción básica de esta práctica es que la muestra colectada represente cierta área con

un margen de error aceptable. Por lo tanto, la metodología de muestreo de suelo a emplear es un factor fundamental para conocer lo más certeramente posible la fertilidad del lote. En este sentido, los muestreos en grilla se han propuesto como herramientas efectivas para caracterizar los patrones de P y otros nutrientes (Wollenhaupt et al., 1994). Este tipo de muestreo consiste en subdividir sistemáticamente un lote en áreas pequeñas o celdas y de cada una de éstas se extrae una muestra compuesta de 10 a 12 submuestras. Los valores de los análisis de suelo obtenidos por el muestreo en grilla se los puede expresar directamente en un mapa para representar las celdas como tales (cuadrícula); o bien pueden usarse para interpolación de un mapa más denso y suavizado por medio de varios métodos estadísticos (Figura 4). Aunque la mayoría de los suelos de la Pampa Húmeda presentan deficiencia de P (Sainz Rozas, 2019), la variabilidad en la disponibilidad de este nutriente a escala de lote no ha sido intensivamente estudiada como en otros países más tecnificados (Mallarino y Wittry, 2004; Fu et al., 2013).

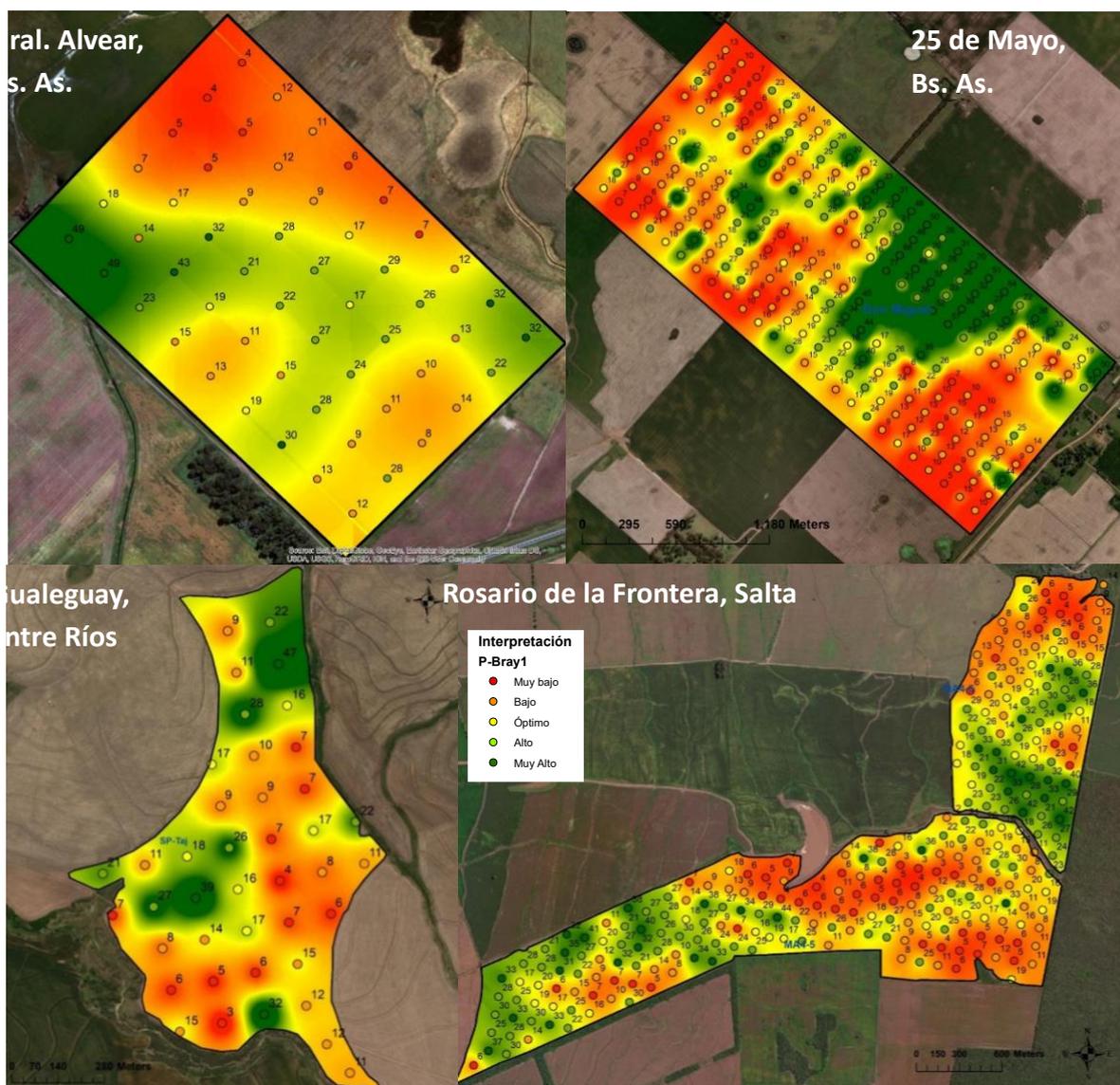


Figura 4. Ejemplo de cuatro lotes muestreados en grilla e interpolación de la información mediante Krigging ordinario mostrando diferentes patrones de variabilidad espacial el fósforo (P-Bray1). Las clases de interpretación fueron definidas como <7, 8-15, 16-20, 21-30 y >30 mg kg⁻¹ P-Bray1, para muy bajo, bajo, óptimo, alto y muy alto, respectivamente, según Sawyer et al. (2002).

Si bien se ha demostrado el valor de los muestreos de suelo densos para representar de manera relativamente precisa la distribución espacial de la fertilidad fosforada de un lote (Bonelli y Pagani, 2025), generalmente existen dudas sobre su costo-efectividad, es decir si esta práctica puede ser justificada económicamente, independientemente de su valor agronómico. Para responder a esa pregunta se utilizó información publicada (Correndo et al., 2018; Sucunza et al., 2018; Pagani y Estelrich, 2020) para simular la respuesta del rendimiento del maíz, el trigo y la soja a la fertilización fosforada en 343 lotes muestreados en grilla en una amplia zona del territorio nacional. Se comparó i) una dosis de P uniforme generada a partir del promedio de todos los puntos de la grilla de cada lote o ii) una dosis variable (entre 0 y 35 kg P/ha) para cada celda de la grilla en forma individual. En ambos casos se utilizaron las recomendaciones publicadas en Echeverría y García (1998) para definir la dosis de fertilizante según el nivel de P-Bray-1 en el suelo y se asumieron precios promedio para los granos y el fertilizante fosforado (SPT) para calcular el incremento de margen bruto (MB) por hectárea en cada lote y cultivo para una fertilización con dosis variable en relación a una con dosis uniforme. Los lotes muestreados presentaron diferentes niveles de variabilidad espacial en la disponibilidad de P con desvíos estándar que variaron entre 2 y 41 mg kg⁻¹ y rangos entre 2 y 221 mg kg⁻¹ (Figura 5), lo que representa una condición característica del área agrícola argentina.

Los resultados de estas simulaciones muestran que la fertilización variable presentó un MB estimado significativamente mayor que el de la fertilización con dosis uniforme (Figura 5, solo se muestran los resultados de soja) y su impacto económico promedio fue de 28, 41 y 31 US\$/ha para soja, maíz y trigo, respectivamente. Estos valores son claramente dependientes de los niveles absolutos de rendimientos considerados y de los precios de los granos (Holmes y Jiang, 2017) y del fertilizante fosforado (el incremento de MB aumenta a medida que lo hacen los precios), pero se consideran representativos a los fines de este análisis comparativo. Cabe aclarar que el aumento simulado de MB se compone de ahorro de fertilizante y/o aumento en la respuesta a P de la fertilización variable respecto a una con dosis uniforme y sólo contempla efectos de corto plazo, ignorando la residualidad de la fertilización y las ventajas para el sistema que la dosis variable de largo plazo provoca al disminuir la variabilidad de P en el suelo (Mallarino y Wittry, 2004).

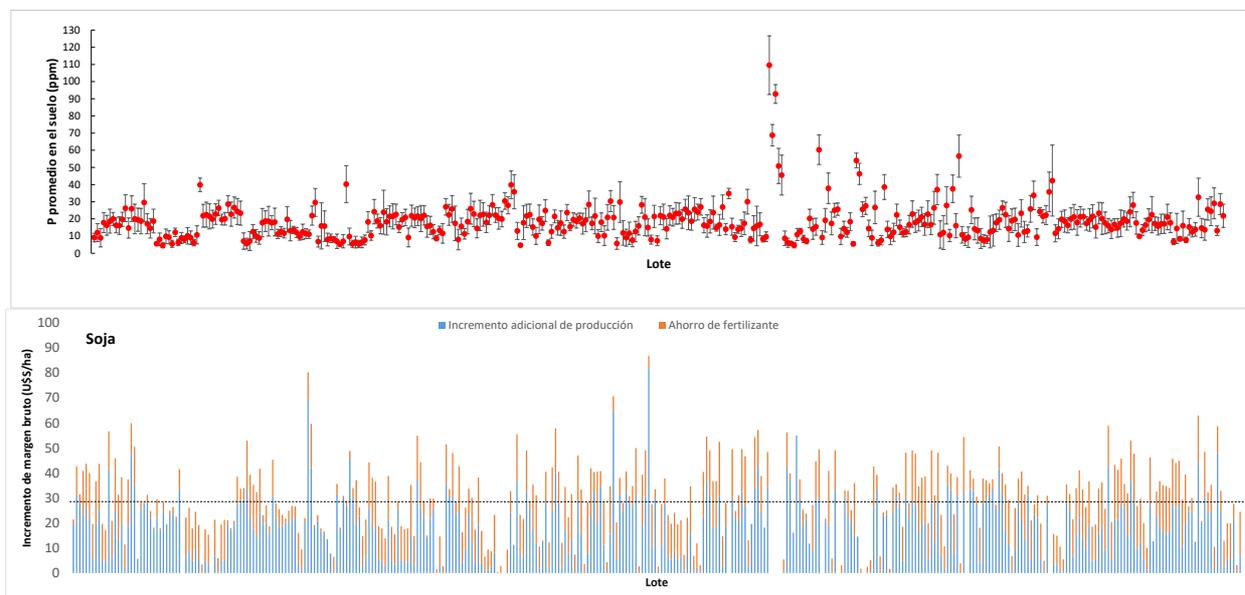


Figura 5. Disponibilidad inicial de fósforo (P) promedio e incremento de margen bruto por hectárea estimado de la fertilización fosforada con dosis variable respecto a un planteo uniforme para soja en 364 lotes. Dichos incrementos se componen en ahorro de fertilizante y/o aumento adicional de producción cuando la dosis variable aplica una dosis de fósforo (P) menor o mayor que la dosis uniforme, respectivamente.

Este estudio de simulación de escala nacional permitió estimar ventajas económicas significativas de la fertilización fosforada con dosis variable basada en un muestreo de suelo en grilla en la gran mayoría de los lotes relevados. Sin embargo, las mayores ventajas económicas de la fertilización variable se observaron en aquellos lotes con mayor nivel de variabilidad de P (CV%), pero especialmente cuando dicha variabilidad se encuentra equitativamente distribuida en los distintos rangos de disponibilidad. Particularmente, los mayores beneficios económicos de la fertilización variable se encontraron en los lotes cuyo promedio de P inicial se encontraba en el rango de 10 a 20 mg kg⁻¹ (Figura 6), en concordancia con lo que ha sido reportado en estudios similares (Mills et al., 2021). Estos resultados pueden explicarse considerando que las ventajas de la fertilización variable tienden a diluirse si el lote presenta valores promedio de P muy bajos (donde una fertilización fosforada con una alta dosis uniforme sería lo recomendado) o cuando el lote presenta valores altos de P (mayores a 20 mg kg⁻¹), donde la probabilidad y magnitud de la respuesta a la fertilización en general se reduce considerablemente.

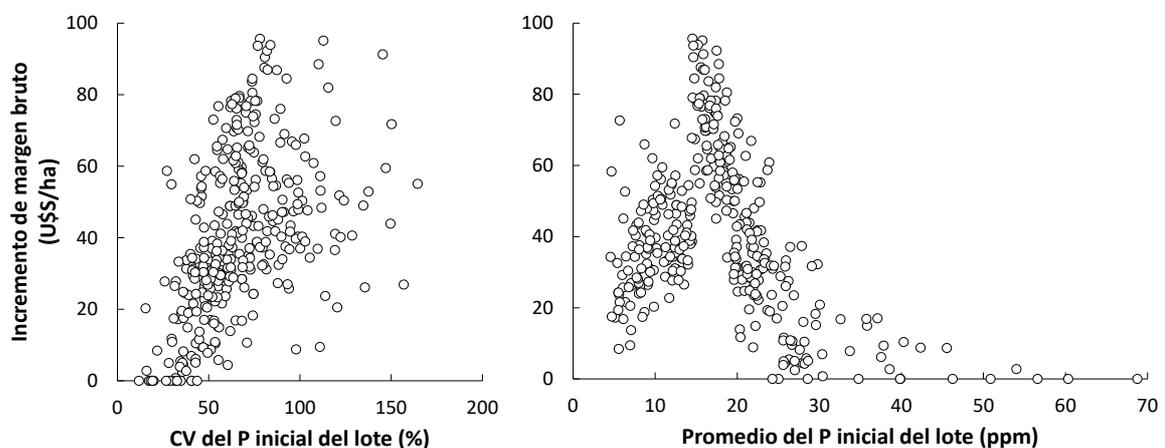


Figura 6. Incremento de margen bruto por hectárea estimado proveniente del ahorro de fertilizante e incremento adicional de rendimiento de la fertilización fosforada con dosis variable respecto a la uniforme para soja en función del coeficiente de variación (CV) del fósforo disponible (P-Bray1) inicial en el suelo y del valor de P inicial promedio de todos los puntos del muestreo de suelo en grilla.

Además de considerar la rentabilidad de la fertilización fosforada con dosis variable en el corto plazo, es de sumo interés conocer la capacidad de esta práctica de manejo para aportar efectos benéficos residuales de mediano plazo al sistema mediante la generación de un mayor nivel de fertilidad acumulada y un cambio positivo en todo el ambiente edáfico. En este sentido, la reducción paulatina de la variabilidad espacial en la distribución de P dentro del lote es un buen indicador de éxito. Es por eso que cobra importancia el monitoreo de los niveles de P en el tiempo a intervalos regulares (generalmente recomendados de tres a cinco años). En la Figura 7 se presenta un ejemplo de la situación inicial de la disponibilidad de P promedio (2017) y su distribución espacial de dos lotes de producción del Centro Oeste Bonaerense y el resultado luego de cinco o seis años de fertilización fosforada con dosis variable basada en un muestreo de suelo en grilla y balances de P, contemplando la exportación de los cultivos mediante el monitoreo de rendimiento. En ambos ejemplos puede observarse un aumento considerable en la disponibilidad de P de los lotes gracias un manejo del nutriente con balances positivos a lo largo de la rotación. Además, es evidente una tendencia paulatina de disminución de la variabilidad de P a nivel intra-lote, particularmente reduciendo el porcentaje del área de los lotes con P en las clases baja y muy baja en línea con lo reportado por Bermúdez y Mallarino (2007). Si bien los resultados del primer ciclo de fertilización variable distan de la perfección (alcanzar la totalidad de la superficie del lote en el rango de

P óptimo) son satisfactorios para comenzar a reducir la variabilidad espacial, incrementando la superficie de los lotes en la zona de suficiencia para no limitar la productividad de los cultivos ni generar excesos que conduzcan a exportación excesiva de P del sistema (consumo de lujo) y riesgos de contaminación ambiental.

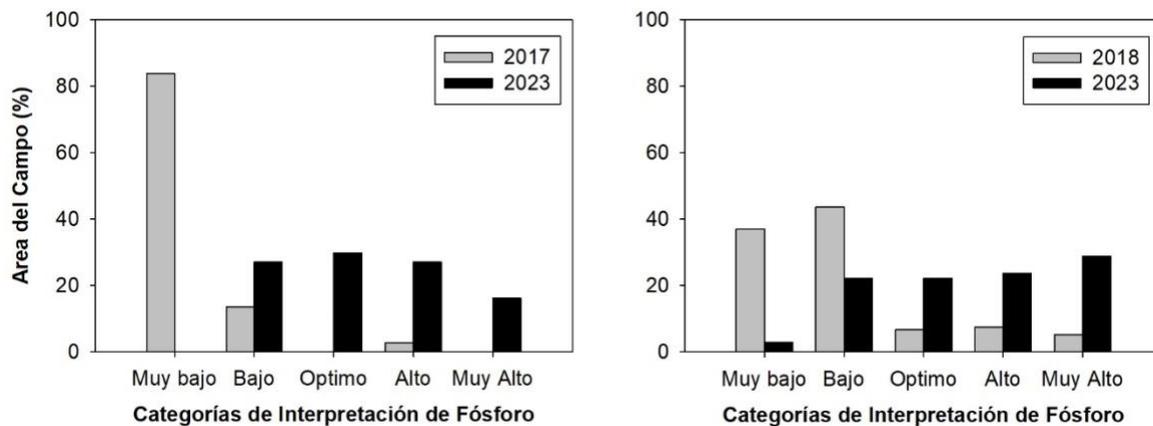


Figura 7. Porcentaje del área de un lote de producción de Carlos Casares y Pehuajó, Bs. As. representado por las clases de interpretación de fósforo (P) en el suelo antes (2017 y 2018) y después de cinco o seis años de fertilización fosforada con dosis variable (2023). Las clases de interpretación fueron definidas como <7, 8-15, 16-20, 21-30 y >30 mg kg⁻¹ P-Bray1, para muy bajo, bajo, óptimo, alto y muy alto, respectivamente, según Sawyer et al. (2002).

>. MANEJO VARIABLE DE NITRÓGENO

El manejo del N en sistemas agrícolas es complejo debido al número de factores que intervienen en la dinámica de este nutriente en el sistema suelo-planta-atmósfera. A diferencia de lo mencionado para P, en la práctica resulta particularmente difícil diagnosticar correctamente las necesidades de N de un cultivo y efectuar una fertilización nitrogenada que maximice el retorno económico de la inversión. Esto se debe a la gran variabilidad temporal en la oferta de N del suelo, en la eficiencia con la cual el cultivo puede recuperarlo y en la variable demanda de N por parte del cultivo en función de su potencial de rendimiento (Hergert et al. 1995; Lambert et al. 2006). Lo anterior cobra mayor relevancia en regiones húmedas o con regímenes de precipitación variables, donde las lluvias juegan un rol central como condicionantes de la mineralización de N del suelo, los procesos de pérdida de N del sistema, el potencial de rendimiento del cultivo y, por ende, la respuesta a fertilización (Eghball y Varvel, 1997).

En condiciones de producción, dependiendo de la heterogeneidad del lote, además de la variabilidad temporal existe variabilidad espacial en el rendimiento de los cultivos y en la respuesta de estos a la aplicación de N (Raun et al., 2002; Scharf et al., 2005; Arana, 2018; Girón, 2019; Puntel et al., 2019; Rompani, 2024). Dicha variabilidad espacial en rendimiento o respuesta a N está relacionada al manejo anterior, al tipo de suelo, topografía, textura, presencia de impedancias físicas para el desarrollo radicular (como tosca y horizonte thapto), presencia de sales y sodio, profundidad de napa, entre otras (Sadras y Calviño, 2001; Bongiovanni, 2002; Mamo et al., 2003; Nosetto et al., 2009). Estas variables condicionan en mayor o menor medida la capacidad del cultivo para responder a la aplicación de N.

En muchas situaciones, la variabilidad temporal y espacial interaccionan entre sí (Eghball y Varvel, 1997). Dichas interacciones hacen que por ejemplo, ciertas áreas de un lote presenten altos rendimientos un año húmedo, pero bajos rendimientos si en el año siguiente se dan condiciones de estrés hídrico. Es por eso que las herramientas de diagnóstico para determinar las necesidades de N en un planteo sitio-específico deberían no solo concentrarse en la determinación de un solo indicador (como el rendimiento

esperado o el nivel de N-nitrato en el suelo), si no que deben integrar los factores más importantes que condicionan la respuesta del cultivo a la aplicación de N.

El empleo de curvas de respuesta de un cultivo a la fertilización nitrogenada es un concepto con varios años de antigüedad (Sawyer et al., 2006). Esta metodología se basa en caracterizar una región, subregión, lote o área dentro del lote en función de la respuesta en rendimiento de cultivos anteriores a la aplicación de niveles crecientes de N y utilizar esta información para decidir futuras fertilizaciones. Específicamente, se ajustan modelos continuos de respuesta a N y se determina el nivel donde la rentabilidad de la fertilización se maximiza o dosis óptima económica (DOE) de N. Para el empleo exitoso de este método se debe contar con un gran número de ensayos de dosis de fertilización nitrogenada repetidos en el mismo ambiente durante varios años a fin de caracterizar debidamente la variabilidad temporal de la respuesta a N en cada sitio. A nivel regional los ambientes tienden a repetirse, por lo que la información generada en los sitios experimentales puede ser utilizada para realizar recomendaciones en condiciones similares.

En la Figura 9 se observan ejemplos de cómo cuatro factores, la elevación del terreno, la textura del suelo (indirectamente estimada a través de la ECa) y la profundidad efectiva del horizonte Petrocálcico (tosca) o Thapto, pueden influenciar marcadamente la productividad de los cultivos y su respuesta a la fertilización nitrogenada dentro de los lotes de producción.

El primer caso de estudio (Figura 9a) proviene de un lote de trigo durante la campaña 2021 en Gral. Pico, La Pampa, con marcada variabilidad topográfica donde puede observarse que el rendimiento máximo (ante suficiencia de N) aumentó a medida que disminuyó la elevación del terreno, debido principalmente a la mayor disponibilidad hídrica de las áreas más deprimidas del paisaje. Esto hizo que la magnitud de la respuesta a la fertilización nitrogenada y, por lo tanto, el rango de DOE también aumente a medida que disminuyó la elevación, como ha sido ampliamente documentado en condiciones similares (Gregoret et al., 2006; Puntel et al. 2019; Rompani, 2024).

El segundo ejemplo (Figura 9b) muestra curvas de respuesta a N en maíz pisingallo en la campaña 22/23 dentro de un lote de Las Lajitas, Salta, con heterogeneidad en la textura (de franco arenoso en las zonas de menor ECa a franco arcilloso en las zonas de mayor ECa) y en el contenido de materia orgánica (Figura 8). En este caso se observó un incremento en el rendimiento del cultivo a medida que aumentó la ECa (la textura del suelo se hace más fina) asociado a una mayor disponibilidad hídrica y un mejor ambiente edáfico en general. A su vez, solamente se observó respuesta a N a partir de cierto nivel de ECa, no encontrándose beneficio de la fertilización (DOE = 0 kg N/ha) en las zonas del lote con ECa < 9 ms/s. Este comportamiento es bastante frecuente cuando el déficit hídrico es el factor más limitante para el crecimiento del cultivo, situación particularmente recurrente en el NOA.

El tercer ejemplo (Figura 9c) proviene de un lote con variabilidad en la profundidad efectiva del suelo a causa del horizonte petrocálcico en Olavarría, Bs. As., donde se observó en la campaña 2016 un rendimiento de trigo máximo de 5 tn/ha cuando la profundidad del suelo fue superior a 60 cm y de 3.7 tn/ha para sectores del lote con suelo somero (<60 cm). Además, la DOE calculada fue de 55 y 105 kg N/ha para la zona de suelo somero y profundo, respectivamente. Resultados similares han sido reportados para el cultivo de maíz en la misma zona de estudio (Arana, 2018)

Finalmente, el cuarto ejemplo (Figura 9d) corresponde a un estudio realizado en dos lotes del partido de Gral. Villegas, Bs. As. (Girón, 2019) en la campaña 2015/16, caracterizada por excesos hídricos durante el ciclo del maíz. En ambos sitios puede observarse que tanto la respuesta a la fertilización nitrogenada como la DOE fueron más altas en las zonas dentro de los lotes con presencia de horizonte Thapto, que en las zonas de suelo profundo (Hapludoles Típicos) sin esta capa de arcilla subsuperficial. Este comportamiento puede explicarse por la ocurrencia de mayores pérdidas de N en las áreas dentro de los lotes de textura más fina, sujetas a condiciones de saturación hídrica más severas debido a la menor capacidad de drenaje (Bremner y Shaw, 1958), donde el rendimiento sin N disminuyó proporcionalmente más que el rendimiento ante suficiencia de N, incrementando la respuesta a la fertilización. Dicho comportamiento general también fue observado en trigo por Rompani (2024) en el Centro Oeste Bonaerense en años de precipitaciones abundantes y es útil para graficar la independencia que existe entre el rendimiento y respuesta a N en regiones húmedas, concepto que ha sido ampliamente desarrollado en numerosos trabajos internacionales (Sawyer et al., 2006; Raun et al., 2010).

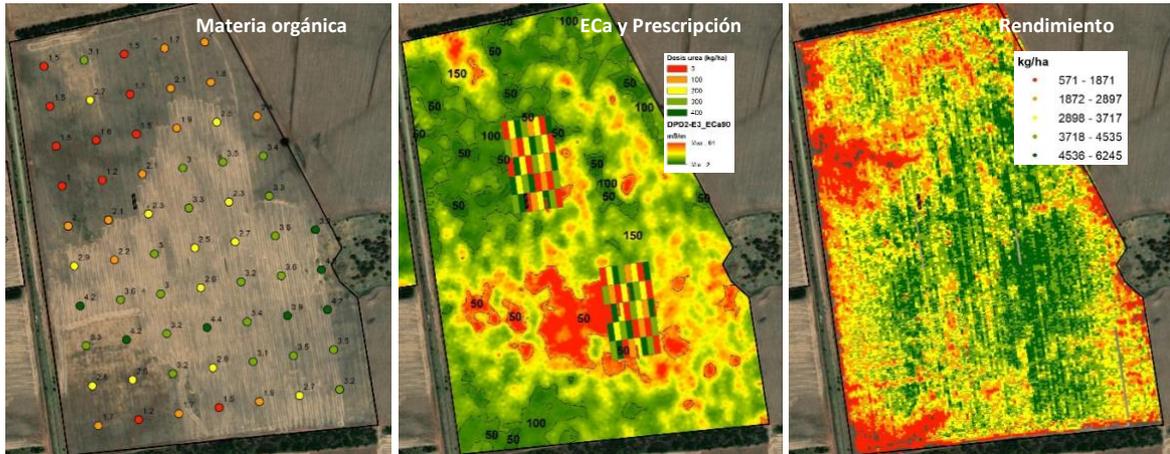
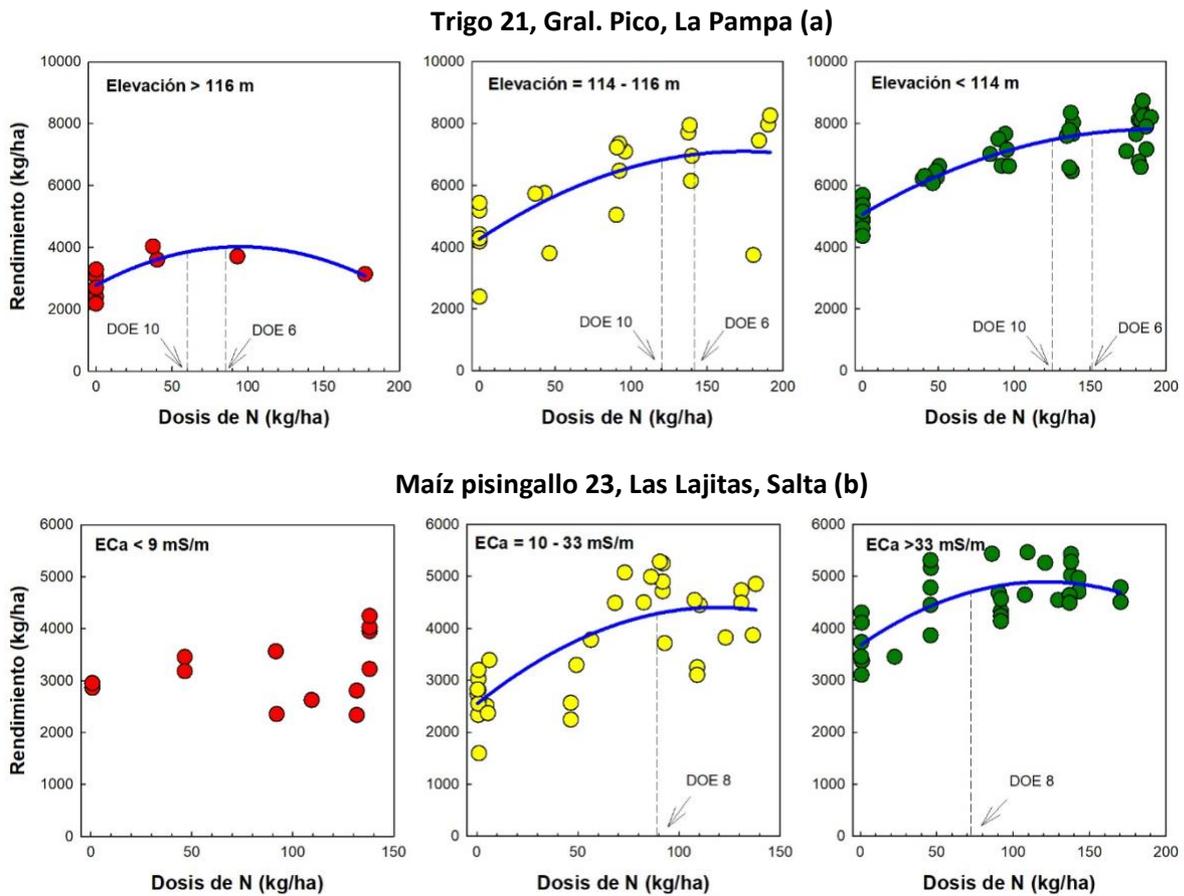


Figura 8. Mapa de materia orgánica (%), conductividad eléctrica aparente (Eca) y prescripción de urea mostrando ensayos en tablero de ajedrez y mapa de rendimiento de maíz pisingallo de la campaña 22/23 en un lote de producción de Las Lajitas, Salta.



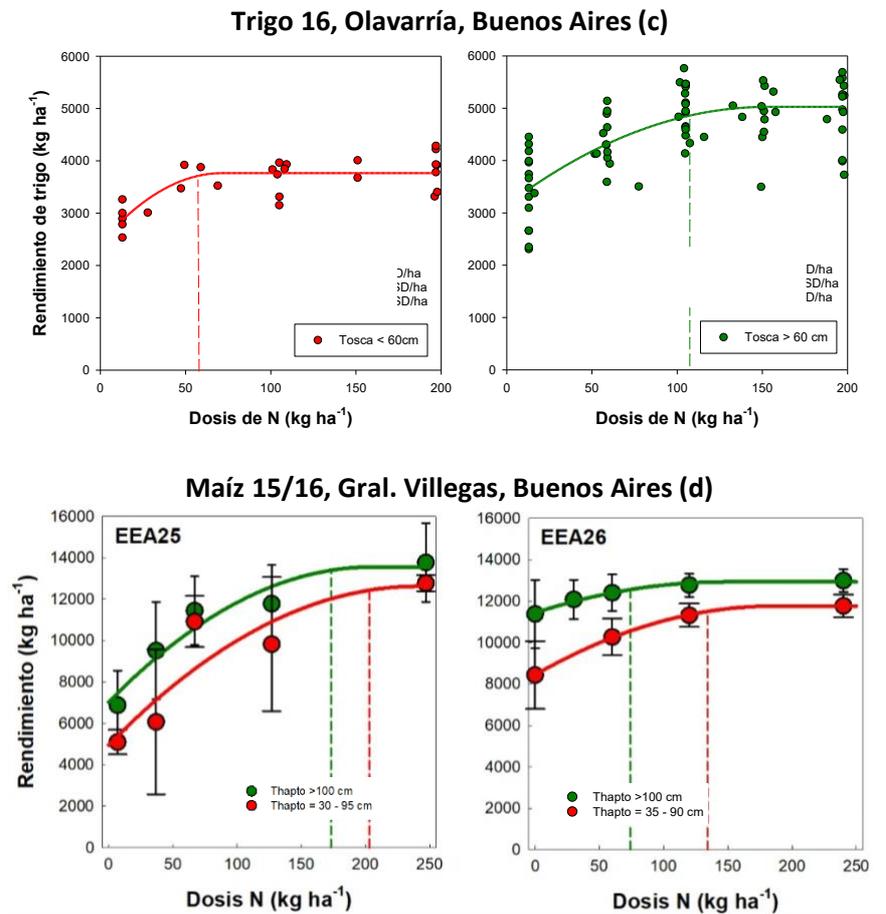


Figura 9. Rendimiento de trigo (a y c), maíz (d) y maíz pisingallo (b) en función de la dosis de nitrógeno (N) aplicada para zonas dentro de los lotes con variabilidad en la elevación, conductividad eléctrica aparente (ECa) y profundidad efectiva (tosca y horizonte Thapto) en las localidades de Gral. Pico, La Pampa (campaña 21), Las Lajitas, Salta (campaña 2023), Olavarría, Buenos Aires (campaña 2016) y Gral. Villegas (campaña 2015/16). Información proveniente de ensayos en tablero de ajedrez (a, b y c) y en franjas (d) fertilizados con máquinas neumáticas y cosechados con monitor de rendimiento. Las líneas punteadas verticales indican la dosis óptima económica (DOE) de N ante diferentes relaciones de precio N/grano.

Estos ejemplos que combinan caracterización ambiental intensiva con investigación en campos de productores ejemplifican para diferentes condiciones de producción la ocurrencia de interacción N por ambiente, es decir que la respuesta a la fertilización nitrogenada varía dentro del lote en respuesta a los procesos que afectan la demanda del cultivo y la oferta del suelo (Bishop y Lark, 2006; Piepho et al., 2011). En este sentido la fertilización nitrogenada con dosis variable basada en un diagnóstico sitio-específico y un enfoque dinámico constituye una herramienta muy útil para maximizar su resultado económico y minimizar el riesgo de generar excesos que constituyan problemas ambientales.

> MANEJO VARIABLE DE OTROS NUTRIENTES

Existe abundante evidencia bibliográfica a nivel internacional acerca del manejo sitio-específico de potasio (K). Al igual que el P, este nutriente presenta elevada variabilidad espacial en lotes con suelos genéticamente heterogéneos o con alta historia de fertilización potásica y/o aplicación de enmiendas orgánicas. Por esa razón, también se han propuesto esquemas de muestreo de suelo en grillas y zonas, para manejar la variabilidad espacial de K y realizar un manejo más eficiente de este nutriente (Mallarino y Wittry, 2004). Generalmente se ha observado que el muestreo de suelo denso es el más apropiado para lotes con extensa variabilidad espacial de K en pequeña escala. En la Figura 10 se muestra un ejemplo de un lote de producción de Uruguay muestreado en grilla en el que puede observarse el alto grado de variabilidad espacial en el K intercambiable, cuyo rango de interpretación varía entre muy bajo y muy alto (Sawyer et al., 2002). En este ejemplo, un 24% del lote no requeriría fertilización potásica mientras que otro 20 y 56% del mismo necesitaría dosis de fertilización altas y muy altas, respectivamente.



Figura 10. Variabilidad espacial de potasio (K) disponible (mg kg^{-1}) en un lote muestreado en grilla en Sarandí de Navarro, Departamento do Río Negro, Uruguay. Las clases de interpretación fueron definidas como <120 , $121-160$, $161-200$, $201-240$ y $>240 \text{ mg kg}^{-1}$ K-Mehlich3, para muy bajo, bajo, óptimo, alto y muy alto, respectivamente, según Sawyer et al. (2002).

Estudios internacionales han demostrado extensa variabilidad espacial en el pH del suelo y en las necesidades de encalado dentro de lotes de producción. Pierce y Warncke (2000) sugieren la conveniencia de la aplicación de enmiendas básicas mediante técnicas de agricultura de precisión a los fines de evitar sub o sobreaplicaciones. En este sentido, Pagani y Mallarino (2015) caracterizaron lotes contrastantes en cuanto a variabilidad espacial del pH del suelo y requerimientos de encalado en el estado de Iowa, EEUU. En la misma región, Bianchini y Mallarino (2002) señalaron que la aplicación de cal en forma variable dentro del lote ayudaba a disminuir la variabilidad espacial del pH edáfico. Al igual que para otros nutrientes, la tecnología de aplicación variable de cal, requiere de un muestreo de suelo intensivo, el cual puede ser en grilla, en zona o mediante el uso de instrumentos que colectan muestras de suelo y analizan su pH en tiempo real. En la Figura 11 se muestra un ejemplo de variabilidad espacial en la respuesta del maíz y la soja al encalado en un lote de 9 de Julio, Bs. As., con variabilidad espacial en la elevación, textura del suelo, capacidad de intercambio catiónico y capacidad buffer de pH. En este estudio de dos años sólo

se observó respuesta significativa al agregado de carbonato de calcio (CaCO_3) finamente molido en soja y maíz en la loma de textura más gruesa pero no en el área más deprimida del paisaje donde el suelo presentaba una textura más fina y mayor capacidad reguladora de la acidez del suelo. Estos resultados alientan a trabajar en la neutralización de suelos ácidos con una concepción sitio-específica, ya que ignorar la variabilidad espacial del pH o la capacidad buffer del suelo puede derivar en dosis insuficientes en sitios donde el problema es más severo, y por otro lado, aplicaciones innecesarias donde el pH es óptimo para el crecimiento de los cultivos con consecuencias negativas importantes (Borgelt et al., 1994).

El conocimiento disponible respecto al manejo de azufre (S) con dosis variable no es abundante. Ciertos estudios sugieren la existencia de respuesta diferencial a la aplicación de S por parte de algunos cultivos según ciertos atributos del paisaje y el suelo. En Minnesota, EEUU, (Kaiser et al., 2010) se determinó a través de ensayos en franjas atravesando la variabilidad espacial de 4 lotes, que el cultivo de maíz respondía significativamente al agregado de S cuando el nivel de MO del suelo era menor a 2%, pero la probabilidad de respuesta bajaba en el rango de MO de 2 a 4%, y haciéndose nula a valores de MO superiores a 4%. En este trabajo se concluyó que la aplicación variable de S podría incrementar la rentabilidad del cultivo de maíz en regiones con marcada variabilidad espacial. En Argentina, si bien no se conocen trabajos de investigación que estudien específicamente la variabilidad espacial de la respuesta a la fertilización azufrada, probablemente puedan aplicarse algunos principios aprendidos para N (Pagani y Echeverría, 2011), teniendo en cuenta la similitud de ambos nutrientes en el sistema suelo-planta-atmosfera.

La información expuesta en esta sección, representa algunos ejemplos de cómo el uso de la tecnología de aplicación variable se ha expandido a otros insumos. En el futuro se espera que el uso de estas herramientas también se haga extensivo a otros nutrientes y enmiendas en la medida que se demuestre el beneficio consistente por su implementación.

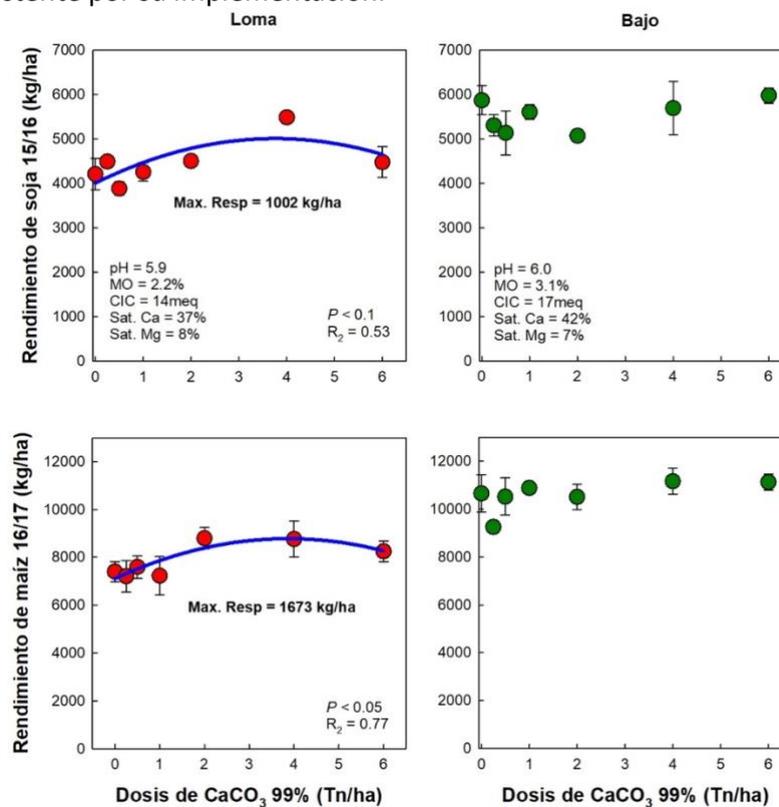


Figura 11. Rendimiento de soja y maíz en función de la dosis de carbonato de calcio (CaCO_3) finamente molido para una loma de textura más gruesa de menor capacidad buffer de pH y un bajo de textura más fina de mayor capacidad buffer en un lote de producción de 9 de Julio, Bs. As. durante las campañas 15/17 y 16/17. Las barras verticales representan los errores standard de la media de tres repeticiones y las líneas azules los modelos de regresión cuadráticos (adaptado de Larrea et al., datos no publicados).

>. CONSIDERACIONES FINALES

En este resumen se presentaron algunas experiencias provenientes de diferentes zonas del área productiva argentina que evidencian cómo las herramientas de agricultura de precisión, la integración de conocimiento básico de fertilidad de suelo y nutrición de cultivos y la investigación en campos de productores pueden contribuir a mejorar el manejo de nutrientes en los sistemas agrícolas. Es necesario seguir profundizando el entendimiento de las capacidades de esta tecnología de manera que cuando su implementación se masifique en Argentina, lo haga aprovechando su máximo potencial.

>. BIBLIOGRAFÍA

- Alesso, C. A., Cipriotti, P. A., Bollero, G. A., & Martin, N. F. 2019. Experimental designs and estimation methods for on farm research: a simulation study of corn yields at field scale. *Agron. J.* 111(6): 2724–2735.
- Alesso, C.A., Cipriotti P.A., Bollero G.A., & Martin, N.F. 2021. Design of on-farm precision experiments to estimate site-specific crop responses. *Agron. J.* 113:1–15.
- Arana, E.D. 2018. Manejo sitio-específico de nitrógeno para el cultivo de maíz en el sudeste bonaerense". Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ciencias Agrarias. Programa de Posgrado en Producción Vegetal.
- Bermúdez, M., & A.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.*
- Bianchini, A.A., & A.P. Mallarino. 2002. Soil-sampling alternatives and variable-rate liming for a soybean–corn rotation. *Agron. J.* 94:1355–1366.
- Bishop, T. F. A., & Lark, R. M. 2006. The geostatistical analysis of experiments at the landscape-scale. *Geoderma*, 133(1–2), 87–106.
- Bongiovanni, R. 2002. A spatial econometrics approach to the economics of site-specific nitrogen management in corn production. Ph.D. Thesis, Department of Agricultural Economics, Purdue University, West Lafayette, IN, 280 p.
- Bonelli, C.I. & A. Pagani. 2025. Evaluación de metodologías para la delineación de zonas de manejo de fósforo. *Actas Simposio Fertilidad 2025*. Rosario, 7 al 8 de mayo.
- Borgelt, S.C., S.W. Searcy, B.A. Stout, & D.J. Mulla. 1994. Spatially variable liming rates: A method for determination. *Trans. ASAE* 37:1499–1507.
- Bremner, J. M. & K. Shaw. 1958. Denitrification in soil 1. Methods of investigation. *Journal of Agricultural Science* 51: 22–39.
- Bullock, D. S., Boerngen, M., Tao, H., Maxwell, B., Luck, J. D., Shiratsuchi, L., . . . & Martin, N. F. 2019. The data-intensive farm management project: Changing agronomic research through on-farm precision experimentation. *Agron. J.* 111(6): 2736–2746.
- Bullock, D. S., & Bullock, D. G. 1994. Calculation of optimal nitrogen fertilizer rates. *Agron. J.* 86(5): 921–923.

- Bullock, D.G., R.G. Hoef, P. Dorman, T. Macy, & R. Olson. 1994. Nutrient management with intensive soil sampling and differential fertilizer spreading. *Better Crops Plant Food*. 78:10-12.
- Correndo, A. 2018. Variables asociadas a la respuesta a la fertilización con nitrógeno y fósforo en maíz y soja en región pampeana. Tesis de Maestría. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Escuela para Graduados Alberto Soriano.
- Echeverría H.E. & F.O. Garcia. 1998. Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. *Boletín Técnico No. 149*. EEA INTA Balcarce.
- Eghball, B., & G.E. Varvel. 1997. Fractal analysis of temporal yield variability of crop sequences: Implications for site-specific management. *Agron. J.* 89:851-855.
- Fu, W., K. Zhao, P. Jiang & Z. Ye. 2013. Field-scale variability of soil test phosphorus and other nutrients in grasslands under long-term agricultural managements. *Soil Res.* 51(6): 503.
- Girón, P. 2019. Manejo sitio-específico de nitrógeno para el cultivo de maíz en el noroeste bonaerense". Tesis de Maestría. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Escuela para Graduados Alberto Soriano.
- Gregoret, M.C., J. Dardanelli, R. Bongiovanni & M. Diaz-Zorita. 2006. Modelo de repuesta sitio-específica del maíz al nitrógeno y agua edáfica en un Haplustol. *Ci. Suelo*. 24(2): 147-159.
- Hergert, G. W., R. B. Ferguson, & C. A. Shapiro. 1995. Fertilizer suggestions for corn. University of Nebraska IANR, NebGuide G74-174-A (Rev. July 1995). Lincoln, NE, University of Nebraska.
- Holmes, A.W. & G. Jiang. 2017. Effect of variable rate lime applications on autumn sown barley performance. *Agronomy New Zealand*. 47:37-45.
- Kaiser, D.E., J.A. Lamb, & K. Kim. 2010. Response to starter applied sulfur in combination with nitrogen and phosphorus across a landscape. p. 66-73. En: Proc. 40th annual North Central Extension Industry Soil Fertility Conference. Nov. 17-18 Des Moines, IA.
- Kindred, D. R., Milne, A. E., Webster, R., Marchant, B. P., & Sylvester-Bradley, R. 2015. Exploring the spatial variation in the fertilizer nitrogen requirement of wheat within fields. *Journal of Agricultural Science*, 153(1), 25-41.
- Lacoste, M., Cook, S., McNee, M., Gale, D., Ingram, J., & Bellon-Maurel. 2022. On-Farm Experimentation to transform global agriculture. *Nature Food*. 3(1): 11-18.
- Lambert, D.M., J. Lowenberg-DeBoer, & G.L. Malzer. 2006. Economic analysis of spatial-temporal patterns in corn and soybean response to nitrogen and phosphorus. *Agron. J.* 98:43-54.
- Mallarino, A.P. & D.J. 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.
- Mamo, M., G.L. Malzer, D.J. Mulla, D.R. Huggins, & J. Strock. 2003. Spatial and temporal variation in economically optimum nitrogen rate for corn. *Agron. J.* 95:958-964.

- Mills, B.E., B.W. Brorsen, & D.B. Arnall. 2021. Using Grid Soil Sampling to Determine Profit-Maximizing Phosphorus Application Rates in Wheat. *Journal of Agricultural and Resource Economics*. 46(2):269–286
- Nosetto, M.D., E.G. Jobbágy, R.B. Jackson, & G.A. Sznaider. 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crops Res.* 113: 138-148.
- Pagani, A. & Echeverría, H.E. 2011. Performance of sulfur diagnostic methods for corn. *Agron. J.* 103:413–421.
- Pagani, A., & C. Estelrich. 2020. Evaluación física y económica de la fertilización con fósforo en experimentos de largo plazo. Poster No 344, Comisión 3. 27mo Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 13 al 16 de Octubre 2020, Corrientes, Argentina.
- Pagani, A., & A.P. Mallarino. 2015. On-farm evaluation of corn and soybean grain yield and soil pH responses to liming. *Agron. J.* 107:71-82.
- Panten, K., Bramley, R. G. V., Lark, R. M., & Bishop, T. F. A. 2010. Enhancing the value of field experimentation through whole-of-block designs. *Prec. Agric.* 11(2): 198–213
- Piepho, H. P., Richter, C., Spilke, J., Hartung, K., Kunick, A., & Thöle, H. 2011. Statistical aspects of on-farm experimentation. *Crop and Pasture Science*. 62(9), 721.
- Pierce, F.J., & D.D. Warnke. 2000. Soil and crop response to variable-rate liming for two Michigan Fields. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 774-780.
- Puntel, L.A., Pagani, A. & Archontoulis, S.V., 2019. Development of a nitrogen recommendation tool for corn considering static and dynamic variables. *Europ. J. Agron.* 105, 189–199.
- Raun, W.R., J.B. Solie & M.L. Stone. 2010. Independence of yield potential and crop nitrogen response. *Precis. Agric.* 12:508–518.
- Raun, W.R., J.B. Solie, G.V. Johnson, M.L. Stone, R.W. Mullen, K.W. Freeman, W.E. Thomason, & E.V. Lukina. 2002. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. *Agron. J.* 94:815–820.
- Rompani, J.M. 2024. Modelos de fertilización nitrogenada en trigo diseñados para apoyar el manejo sitio-específico del cultivo en el centro oeste bonaerense. Tesis de Maestría. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Escuela para Graduados Alberto Soriano.
- Sadras, V.O., & P.A. Calviño. 2001. Quantification of grain yield response to soil depth in soybean, maize, sunflower, and wheat. *Agron. J.* 93(3): 577-583.
- Sawyer, J.E., A.P. Mallarino, R. Killorn & S.K. Barnhart. 2002. A general guide for crop nutrient and limestone recommendations in Iowa. Publ. PM-1688 (Rev.). Iowa State Univ. Ext., Ames.
- Sawyer, J., E. Nafziger, G. Randall, L. Bundy, G. Rehm, & B. Joern. 2006. Concepts and Rationale for Regional Nitrogen Rate Guidelines for Corn (PM-2015). Iowa State Univ. Extension.
- Sainz Rozas, HE; N. Wyngaard; M. Eyherabide; G. Larrea; N. Martínez Cuesta; N.I. Reussi Calvo & H. Angelini. 2019. Cambios en la disponibilidad de nutrientes en la región pampeana. Actas XXVII Congreso AAPRESID. Rosario, 7 al 9 de agosto.
- Scharf, P.C., N.R. Kitchen, K.A. Sudduth, J.G. Davis, V.C. Hubbard, & J.A. Lory. 2005. Field-scale variability in optimal nitrogen fertilizer rate for corn. *Agron. J.* 97(2): 452-461.

- Scharf, P.C., N.R. Kitchen, K.A. Sudduth, & J.G. Davis. 2006b. Spatially variable corn yield is a weak predictor of optimal nitrogen rate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 2154–2160.
- Sucunza, F.A., F.H. Gutierrez Boem, F.O. Garcia, M. Boxler & G. Rubio. 2018. Long-term phosphorus fertilization of wheat, soybean and maize on Mollisols: Soil test trends, critical levels and balances. *Europ. J. Agron.* 96, 87–95.
- Trevisan, R. G., Bullock, D. S., & Martin, N. F. 2020. Spatial variability of crop responses to agronomic inputs in on-farm precision experimentation. *Precision Agriculture*. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09720-8>
- van Alphen, B. J., & Stoorvogel, J. J. 2000. A functional approach to soil characterization in support of precision agriculture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1706-1713.
- Whelan, B. M., & Taylor, J. A. 2013. *Precision agriculture for grain production systems*. Collingwood: CSIRO Publishing.
- Wollenhaupt, N.C., R.P. Wolkowski, & M.K. Clayton. 1994. Mapping soil test phosphorus and potassium for variable-rate fertilizer application. *J. Prod. Agric.* 7:441-448.