

BENEFICIOS POTENCIALES DEL USO DE LAS HERRAMIENTAS DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN EL DIAGNÓSTICO Y APLICACIÓN DE FERTILIZANTES

Fernando O. García

INPOFOS Cono Sur

Av. Santa Fe 910 – (B1641) Acassuso – Buenos Aires – Argentina

fgarcia@inpofos.org

La Agricultura de Precisión (AP), o manejo sitio-específico (MSE) de cultivos y suelos, ha sido definida como “el uso de las llamadas tecnologías de información para la toma de decisiones de manejo técnica, económica y ambientalmente adecuadas para la producción agrícola” (CAPUC, 2002) o “la utilización de modernas herramientas que permiten la obtención y análisis de datos georeferenciados, mejorando el diagnóstico, la toma de decisiones y la eficiencia de uso de los mismos” (Proyecto AP, INTA Manfredi, 2000).

En el Cono Sur, las tecnologías de AP comenzaron a desarrollarse desde los mediados de la década del '90 con trabajos en Argentina, Brasil, Chile y Uruguay, fundamentalmente en el ámbito de instituciones estatales de investigación y experimentación, como INTA en Argentina e INIA en Chile, y con importantes aportes del sector privado.

Las tecnologías que la AP pone al alcance de la producción e investigación permitirían hacer un uso más eficiente de los recursos desde el punto de vista agronómico, económico y ambiental. Entre las tecnologías disponibles se pueden mencionar:

- Mapas de rendimiento georeferenciados
- Mapas de malezas georeferenciados
- Mapas de suelo georeferenciados
- Imágenes satelitales y fotografías aéreas
- Sensores de suelos y cultivos en tiempo real
- Utilización de dosis variables de agroquímicos, fertilizantes y semillas
- Evaluación de ensayos a campo considerando la variabilidad “real” de los lotes.

EL MANEJO SITIO-ESPECÍFICO DE NUTRIENTES

El MSE reconoce que la extensa variabilidad espacial en propiedades del suelo y productividad de los cultivos es la norma más que la excepción en la gran mayoría de los lotes (Mulla y Schepers, 1997). El objetivo del MSE es identificar, caracterizar y manejar las limitaciones productivas, económicas y ambientales más relevantes en cada sitio y tiempo determinado. La Figura 1 muestra los factores que afectan la producción de cultivos según Fageria et al. (1999). La gran mayoría de estos factores presenta variabilidad espacial y temporal, y las variaciones de uno o más de ellos generan variabilidad en los rendimientos. El mayor desafío, para el MSE, es determinar los factores que están, espacial y temporalmente, limitando la producción y afectando el ambiente.

Desde el punto de vista del manejo de la fertilidad de suelos y nutrición de cultivos, la AP ofrece la posibilidad de realizar aplicaciones de dosis variables de fertilizantes según las necesidades del cultivo en cada sitio y momento para alcanzar una mayor eficiencia del recurso fertilizante optimizando el beneficio económico, reduciendo el impacto ambiental y mejorando la eficiencia de uso de los otros factores involucrados en la producción agrícola. La aplicación variable de fertilizante es la tecnología de AP más difundida entre las usadas por los productores en EE.UU. (Roberts, 2000). Las ventajas de las aplicaciones variables pueden surgir de un mayor rendimiento total del lote con un mayor o igual uso de fertilizante con respecto a la dosis fija, o de un menor uso de fertilizante sin disminución del rendimiento

total del lote (Tabla 1) (Melchiori et al., 2000; Mallarino, 2001; Best et al., 2002; Melchiori, 2002). En muchas ocasiones, la cantidad total de fertilizante a aplicar con la aplicación variable es superior a la cantidad aplicada con dosis fijas, ya que los niveles de análisis de suelo están sesgados positivamente en la mayoría de los lotes, es decir que sobrestiman el nivel de fertilidad del lote (Tabla 2) (Roberts, 2000).

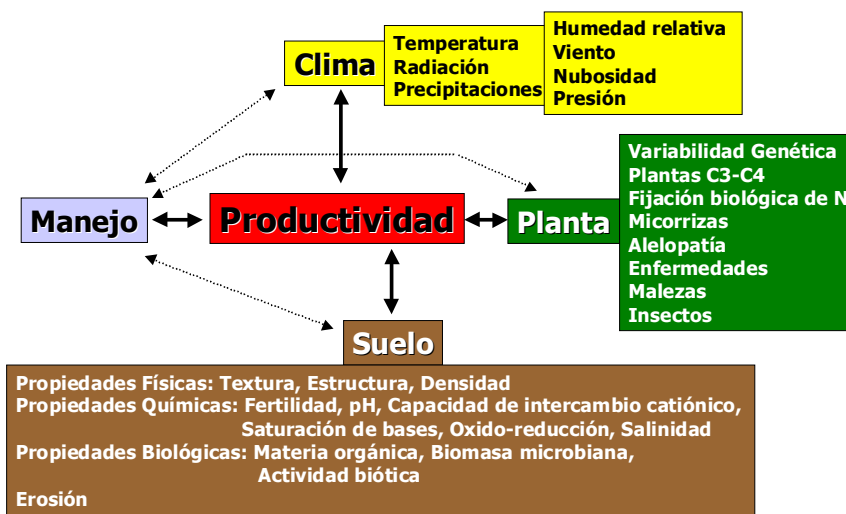


Fig. 1. Factores que afectan la productividad de los cultivos. Adaptado de Fageria et al. (1999).

Tabla 1. Diferencias en rendimiento de grano y fertilizante aplicado debido a la fertilización fosfatada con dosis fijas o variables para la rotación maíz-soja en Iowa (EE.UU.) (Mallarino, 2001).

Campo	P disponible inicial			Cultivo	Fertilizado†	Diferencia Variable menos Fija			
	Min	Media	Máx.			P ₂ O ₅ usado	Rendimiento de Grano		1er cultivo
	ppm				kg/ha	kg/ha			
1	8	18	34	Maíz	4	100	N/A		
2	6	15	35	Maíz	-6	138	*	-7	‡
3	2	11	66	Maíz	-19	50	‡	27	‡
4	6	18	43	Maíz	13	63	‡	161	*
5	5	9	22	Maíz	17	238	*	34	
6	13	22	96	Soja	-5	-40	N/A		
7	8	16	24	Soja	-11	-44	‡	-101	
8	4	11	23	Soja	-28	0	‡	-60	‡
9	6	20	53	Soja	-21	36	N/A		
10	4	21	72	Soja	-17	20	-43		
11	10	21	40	Soja	-52	81	‡	-144	

† Se aplicó una sola vez la dosis para los dos años de la rotación, como hacen la mayoría de los productores. Números negativos indican que se aplicó menos fertilizante o que el cultivo rindió menos con la aplicación variable.

‡ Respuesta significativa a P pero no al método de fertilización. * Respuesta significativa a P y diferencia significativa entre métodos de fertilización. N/A = El campo no se pudo seguir evaluando.

En los comienzos de la AP, fundamentalmente en EE.UU. y Europa, se buscó generar mapas de aplicación variable de nutrientes utilizando distintas alternativas de muestreos de suelo (grilla, grilla sistematizada, etc.), a partir de los cuales se preparaban mapas de disponibilidad de nutrientes (por ej., P disponible) y, en función de las distintas disponibilidades, los mapas de aplicación variable. Sin

embargo, estas estrategias de muestreos en grilla presentaban un alto costo en tiempo y recursos. En los últimos años, se ha propuesto la adopción de sistemas de zonas de manejo (*management zones*) que utilizan mapas de rendimientos, topografía, fotografías aéreas, fotos satelitales y mapas de conductividad eléctrica (Doerge, 1999; Fleming et al., 1999; Mallarino, 2001). Este manejo en zonas permite reducir los costos de muestreo de suelos y simplifica el MSE, especialmente para productores y asesores que recién se inician. En numerosas ocasiones, estas zonas de manejo se corresponden con la posición en el paisaje: loma, media loma y bajo (Doerge, 1999; Franzen y Kitchen, 1999; Bongiovanni, 2002).

Tabla 2. Descripción estadística del análisis de suelo con una grilla de 65*65 m de un campo de Alberta (Canadá) (Penney et al., 1996).

Año	N° de Muestras	Nutriente	Rango	Promedio	Modo
				ppm	
1993	58	N-NO ₃	7-134	24	11
	58	P	0-90	13	9
	58	K	119-618	293	159
	58	S-SO ₄	9-6330	597	11
1994	55	N-NO ₃	2-24	11	8
	55	P	0-104	15	9
	55	K	127-598	276	155
	55	S-SO ₄	7-9440	480	10
1995	55	N-NO ₃	4-43	20	15
	55	P	3-98	18	8
	53	K	112-499	265	183
	52	S-SO ₄	7-11880	558	22

Una de las tecnologías de AP que se ha desarrollado con mayor intensidad para el MSE de nutrientes es la de los sensores remotos que permiten realizar aplicaciones variables de N (Scharf y Lory, 2000; Schepers, 2002). Estas tecnologías han sido evaluadas en maíz (Melchiori, 2002) y en caña de azúcar (F. Pérez Zamora, com. pers.) en Argentina.

La probabilidad de encontrar respuestas rentables al uso de muestreos intensivos y aplicación de dosis variables depende de: i) el grado de variabilidad del lote, los lotes con mayor variabilidad presentan más oportunidades de uso rentable del MSE; ii) el valor del producto cosechado del cultivo; y iii) la metodología de imputación de costos (Lowenberg-De Boer y Swinton, 1997; Reetz, 1999).

DESAFÍOS PARA EL MANEJO SITIO-ESPECÍFICO DE NUTRIENTES

El desarrollo del MSE de nutrientes ha planteado una serie de interrogantes a partir de los inconvenientes surgidos en su implementación, por ejemplo:

1. ¿Es solamente la disponibilidad del nutriente quien esta limitando el rendimiento del cultivo?
2. ¿Son adecuadas las metodologías de recomendación actuales? ¿Cuál es la cantidad de nutriente que debo agregar en cada sector?
3. ¿Qué implica esta variabilidad espacial en el análisis del nutriente?

Las respuestas a estas preguntas no están relacionadas solamente con el MSE, sino con las problemáticas agronómicas y deben ser abordadas desde el punto de vista del conocimiento de mecanismos y procesos que definen los efectos de los distintos factores de producción sobre el cultivo y, en el caso particular de los nutrientes, de la dinámica de los mismos en el sistema suelo-planta-atmósfera. Esto nos permitirá no solo explicar las necesidades de dosificaciones variables, sino también la variabilidad de los cultivos y sus rendimientos, es decir los mapas de rendimiento, y asegurará el éxito productivo, económico y ambiental del MSE.

Las tecnologías de AP ofrecen una oportunidad excelente para conocer los procesos y mecanismos y para evaluar distintos manejos fijos y/o variables a través de su uso en ensayos de campo. Por ejemplo, la Figura 2 muestra el mapa de rendimiento de un ensayo de fertilización de la Red de la Asociación de Productores en Siembra Directa (AAPRESID), donde se pueden observar distintas respuestas en rendimiento obtenidas con los tratamientos evaluados en distintos sectores del lote. La evaluación específica de esos sectores permite asociar la respuesta en rendimiento a determinadas propiedades del suelo y otros factores de producción.

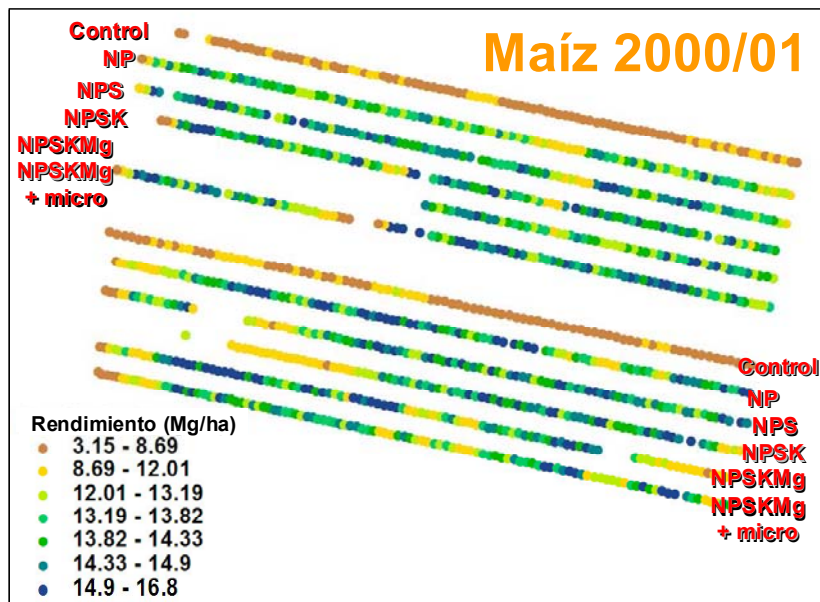


Fig. 2. Mapa de rendimientos del ensayo La Lucía (Monte Buey, Córdoba) de la Red de Ensayos de AAPRESID. Información de A. Bianchini y J. Romagnoli.

La variabilidad observada en la respuesta a un determinado tratamiento de fertilización demuestra la necesidad de integrar los efectos de los factores de producción sobre el cultivo. El rendimiento y la respuesta a la fertilización no dependen solamente de la disponibilidad de los nutrientes en el suelo, sino también de los otros factores de producción (Ortega et al., 1997). Las tecnologías de AP ofrecen la oportunidad de desarrollar nuevas recomendaciones de fertilización y/o mejorar las existentes (Pena-Yewtukhiw et al., 2001).

Un concepto de gran importancia a tener en cuenta en el desarrollo del MSE es la multidisciplinariedad. El trabajo multidisciplinario dispone de un potencial humano de evaluación superior y permite enfrentar las situaciones desde distintos puntos de vista integrando los factores de producción. La integración cuantitativa y cualitativa de los factores de producción se puede realizar a través de la simulación del crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos. Los modelos de simulación desarrollados en los últimos años tienen la capacidad de predecir mecánicamente, dependiendo del grado de desarrollo del modelo, los efectos del ambiente y el manejo en distintos escenarios productivos.

EXPERIENCIAS RECIENTES DE MSE EN EL CONO SUR

En los últimos años, se han desarrollado experiencias de MSE de fertilidad de suelos y fertilización de cultivos en el Cono Sur, entre las que se incluyen las siguientes:

1. Viticultura en Chile: Flores et al. (2002) encontraron relación espacial entre algunas variables de suelo (textura, conductividad eléctrica) y de producción y calidad de uva en tres cuarteles de la VII Región, y sugieren analizar la estabilidad temporal de dicha relación y la importancia de las

propiedades químicas y del riego en la respuesta de las plantas. Esser y Ortega Blu (2002) determinaron áreas de alta calidad de uva asociadas con zonas de manejo definidas en términos de fertilidad de suelo en viñedos comerciales de la Región Metropolitana y la V Región.

2. N en maíz para silo en Chile: Best et al. (2002) reportaron un incremento del 50% en la eficiencia de uso del N aplicado bajo MSE comparado con un manejo uniforme. Estas diferencias se basan en una menor aplicación de N y rendimientos similares entre ambos sistemas de manejo.
3. N en trigo y en maíz en la región pampeana argentina: Melchiori et al. (2000) evaluaron la utilización de dosis variable (DV) vs. dosis uniforme (DU) en trigo en el sudeste de Buenos Aires según la disponibilidad inicial de N-nitratos en el suelo. Los resultados mostraron un menor uso de N fertilizante y una mayor eficiencia de uso de N suministrado con DV, mientras que el rendimiento fue significativamente mayor con DU que con DV. En maíz, Melchiori (2002) comparó aplicaciones de N con DV vs. DU según la prescripción del N Sensor desarrollado por Hydro Agri. El rendimiento fue superior con DV que con DU con niveles similares de N aplicado.
4. Fertilización nitrogenada de maíz según zonas de manejo definidas por posición topográfica: Ensayos realizados en diferentes ambientes del sur de Córdoba en el marco del convenio INTA Manfredi-Purdue University-Grupo de productores de Río IV. (Bongiovanni, 2002; <http://www.agriculturadeprecision.org/articulos/analecon.htm>).
5. Fertilización en zonas de manejo en trigo y maíz bajo riego en el centro de Córdoba dentro del Proyecto Agricultura de Precisión liderado por el Ing. Mario Bragachini de INTA Manfredi (Córdoba, Argentina), Campañas 1999/00, 2000/01, 2001/02 y 2002/03 (www.agriculturadeprecision.org).

CONSIDERACIONES FINALES

Los beneficios potenciales de las tecnologías de AP y, específicamente, del MSE de nutrientes han sido claramente demostradas por las investigaciones y experiencias realizadas en los últimos años en el ámbito internacional y en la región del Cono Sur. Estas mismas investigaciones y experiencias han generado una serie de preguntas y nuevos desafíos para el MSE y, con un criterio más amplio, para la agronomía. Para responder a estos desafíos, Reetz y Fixen (1999) han propuesto una aproximación estratégica al manejo sitio-específico (Fig. 3).

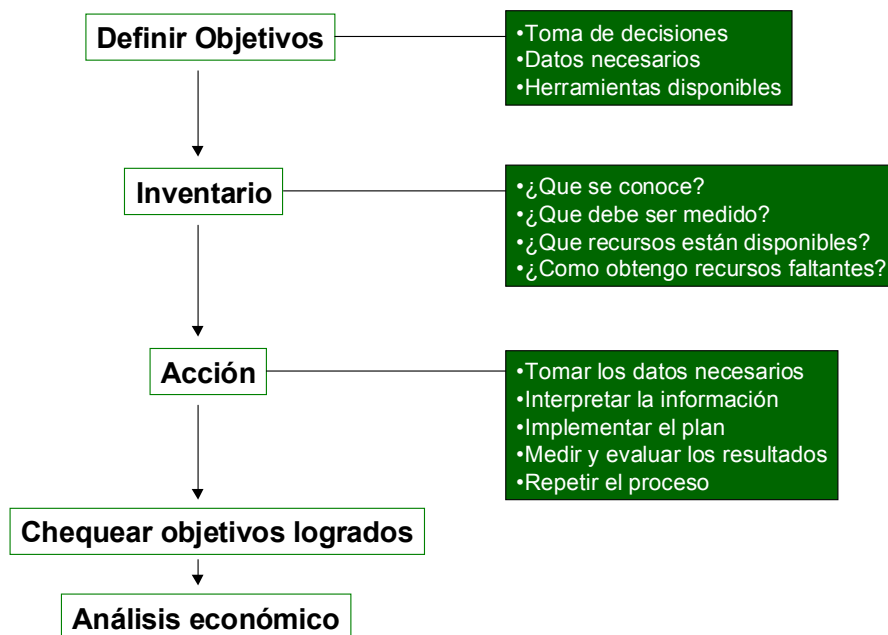


Fig. 3. Aproximación estratégica al manejo sitio-específico. Adaptado de Reetz y Fixen (1999).

Los conocimientos agronómicos y el sentido común hacen la diferencia en un plan exitoso de MSE. El trabajo multidisciplinario, la consideración de todos los factores de producción y la investigación de procesos y mecanismos involucrados en la producción agrícola sustentarán este éxito.

REFERENCIAS

- Best S., J. Hirzel, E. Ruz, L. Flores y A. Vidal. 2002. Uso de criterios de variabilidad espacio-temporal para la fertilización nitrogenada de maíz. Actas IX Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. SCCS - Universidad de Talca. Talca, Chile.
- Bongiovanni, R. 2002. A Spatial Econometric Approach to the Economics of Site-Specific Nitrogen Management in Corn Production. Ph.D. Thesis, Agricultural Economics, Purdue Univ. 306 pp. <http://www.agriculturadeprecision.org/articulos/analecon.htm>
- Bragachini M., A. von Martini y A. Méndez. 2000. La agricultura de precisión en Argentina. Seminario Taller Agricultura de Precisión en el Cono Sur. PROCISUR. Buenos Aires, Argentina.
- CAPUC. 2002. Centro de Agricultura de Precisión. Trifolito de difusión. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. Pontificia Universidad Católica. Santiago, Chile.
- Doerge T. 1999. Management zone concepts. Site-specific management guideline No. 2. Potash and Phosphate Institute. Norcross, Georgia, EE.UU.
- Esser A. y R. Ortega Blu. 2002. Aplicaciones de la viticultura de precisión en Chile: Estudio de casos. Agronomía y Forestal UC 5 (17):17-21.
- Fageria N., L. Stone y A. Baeta dos Santos. 1999. Maximização da eficiência de produção das culturas. EMBRAPA Arroz e Feijão. Brasília, DF. Brasil.
- Fleming K., D. Westfall y D. Wiens. 1999. Field testing management zones for VRT. Site-specific management guideline No. 21. Potash and Phosphate Institute. Norcross, Georgia, EE.UU.
- Flores L., S. Best, N. Rodríguez, J. Sotomayor y E. Ruz. 2002. Variabilidad espacial de algunas propiedades del suelo y su influencia en el rendimiento y calidad de las uvas. Actas IX Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. SCCS - Universidad de Talca. Talca, Chile.
- Franzen, D.W. y N.R. Kitchen. 1999. Developing management zones to target nitrogen applications. Site-specific management guideline No. 5. Potash and Phosphate Institute. Norcross, Georgia, EE.UU.
- Lowenberg-De Boer J. y S. Swinton. 1997. Economics of site-specific management in agronomic crops. In The state of site-specific management for agriculture. F. Pierce y E. Sadler (ed.). ASA-CSSA-SSA. Madison, Wisconsin, EE.UU.
- Mallarino A. 2001. Manejo de nutrientes sitio-específico con énfasis en el muestreo de suelos y la fertilización variable con fósforo y potasio. Tercera Jornada de Actualización Técnica para Profesionales "Fertilidad 2001". INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Melchiori R. 2000. Tesis M.Sc. Programa de Postgrado en Producción Vegetal. Facultad Ciencias Agrarias (UNMdP) - EEA INTA Balcarce.
- Melchiori R., F. Garcia y H. Echeverría. 2000. Variabilidad espacial en algunas propiedades del suelo. II. Manejo del N por sitio específico en el cultivo de trigo. Actas CD XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Buenos Aires. AACS.
- Melchiori R. 2002. Manejo sitio-específico de nitrógeno en maíz: Evaluación del N-sensor. Actas X Congreso Nacional de AAPRESID. Rosario, Santa Fe.
- Mulla D. y J. Schepers. 1997. Key processes and properties for site-specific soil and crop management. In The state of site-specific management for agriculture. F. Pierce y E. Sadler (ed.). ASA-CSSA-SSA. Madison, Wisconsin, EE.UU.
- Ortega R., D. Westfall y G. Peterson. 1997. Variability of phosphorus over landscapes and dryland winter wheat yields. Better Crops 81 (2):24-27. Potash and Phosphate Institute. Norcross, Georgia, EE.UU.
- Pena-Yewtukhiw E., J. Grove, J. Thompson y C. Kiger. 2001. New technologies and analytical tools for fertilizer recommendations? Better Crops 85 (1):18-22. Potash and Phosphate Institute. Norcross, Georgia, EE.UU.
- Penney, D.C., R.C. McKenzie, S.C. Nolan y T.W. Goddard. 1996. Use of crop yield and soil-landscape attribute maps for variable rate fertilization. In Proceedings Great Plains Soil Fertility Conference, Denver, Colorado. 6:126-140.
- Reetz H. 1999. La fertilización con P y K en los cultivos de maíz y soja. Actas VII Congreso Nacional de AAPRESID. Mar del Plata, Buenos Aires.
- Roberts T. 2000. Manejo sitio-específico de nutrientes: Avances en aplicaciones con dosis variable. Seminario Taller Agricultura de Precisión en el Cono Sur. PROCISUR. Buenos Aires, Argentina.
- Schepers J. 2002. Nitrogen management: New technologies for management and diagnosis of nitrogen fertilization. Actas X Congreso Nacional de AAPRESID. Rosario, Santa Fe.
- Scharf P. y J. Lory. 2000. Calibration of remotely-sensed corn color to predict nitrogen need. Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture. ASA-CSSA-SSA. Madison, Wisconsin, EE.UU.