



Figura 1: tecnologías y prácticas asociadas al manejo sitio específico.

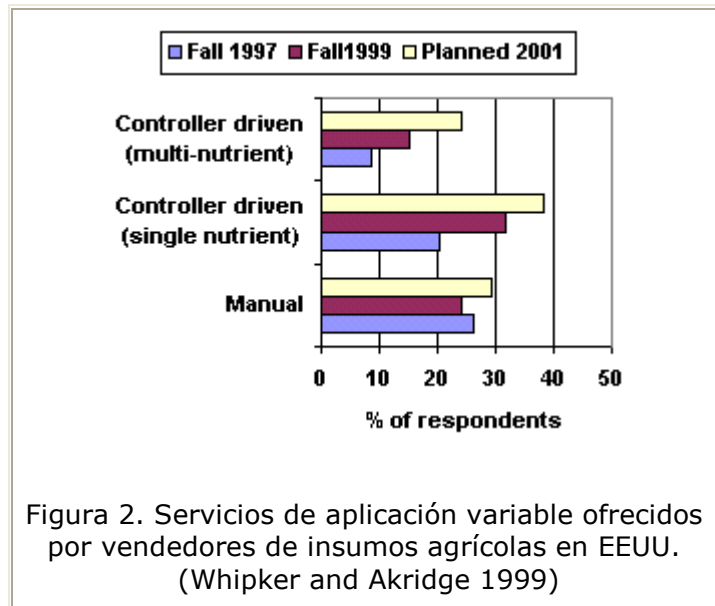
La tecnología de dosis variable es la herramienta que permite la implementación de decisiones de manejo en MSE. Una máquina para aplicaciones equipada con hardware y software controla aplicaciones variables en tres áreas: siembra, pulverización y fertilización. La idea es relativamente simple. Comienza con información oportuna precisa, ej. varios años de mapas de rendimiento, datos de análisis de suelo, ubicación de infestación de malezas, etc. Se realiza un mapa de prescripción utilizando un software GIS, y el aplicador variable acoplado a un DGPS aplica la dosis correcta de semilla, herbicida o fertilizante exactamente donde se necesita.

Los equipamientos para la aplicación variable están disponibles comercialmente en los últimos años, pero pocos productores los han comprado. En cambio se han apoyado en contratistas. Sin embargo, los controladores que varían las dosis de insumos están fácilmente disponibles, y estos se están volviendo cada día más populares en sembradoras que también aplican fertilizantes. El controlador en sí mismo es un monitor montado en la cabina del tractor (o aplicador). Tiene entradas (generalmente de datos seriales) que aceptan datos de una computadora de aplicación variable.

El propósito de este trabajo no es el de discutir sobre equipamiento de dosis variable. A pesar de que se han hecho considerables avances en software y equipos para hacer la aplicación de fertilizantes confiable, cuando y donde se desea en el lote, existe considerable incertidumbre de como usar totalmente y de forma rentable esta tecnología en el manejo de nutrientes. Este trabajo enfocará en el concepto de aplicación variable aplicada al manejo de nutrientes y algunos puntos que deben ser considerados al adoptar esta práctica.

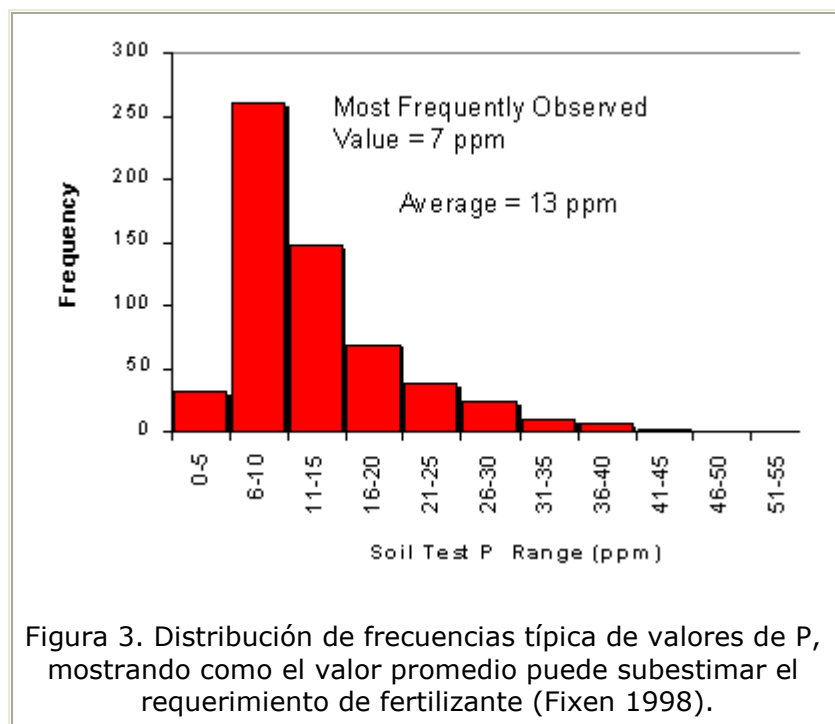
La aplicación variable de fertilizante es la tecnología más difundida de las usadas hoy en día en EEUU. Una investigación reciente sobre 2500 vendedores de insumos agropecuarios en EEUU, reportó que el servicio de aplicación variable es una de las prácticas más comunes entre los servicios de precisión ofrecidos y es a menudo ofrecida junto con el servicio de aplicación tradicional. Del 83% de los encuestados que ofrecían el servicio de aplicación, casi la mitad espera ofrecer la aplicación variable para fines de 1999, con 75% que planea proveer este servicio para el año 2001.

La aplicación variable puede ser controlada manualmente, pero 4 de cada 10 encuestados ofrece algún tipo de aplicación controlada- o un solo nutriente (simple) o varios (múltiple) (Figura 2). La aplicación variable de un simple es la más común, pero se espera que la múltiple crezca rápidamente. Ambas áreas han crecido significativamente desde 1997. La aplicación variable simple ha crecido en un 10% y el número de vendedores que ofrecen aplicaciones variables múltiples se ha casi duplicado.



El precio promedio cobrado por hectárea por estos servicios es: \$9,71 para manual, \$13,3 por aplicación variable simple con controlador, y \$18,61 por aplicación variable múltiple con controlador. Los servicios de aplicación variable son caros, y la tecnología evoluciona continuamente, pero es esencial para el Manejo Sitio Específico y ofrece gran potencial para mejorar la rentabilidad del productor.

El potencial de la aplicación variable para mejorar la rentabilidad no significa que lo haga a través de reducción de costos. Los costos de aplicación son altos, y nuestra experiencia determina que con MSE las dosis de fertilizante rara vez disminuyen. Con aplicación variable, la cantidad total de fertilizante aplicado generalmente aumenta o permanece constante.



Varios estudios en Norte América mostraron que la variabilidad de suelo a menudo lleva a una subfertilización con manejos a nivel de lote. Esto se debe a que los niveles de análisis de suelo están sesgados positivamente en la mayoría de los lotes, como se muestra en la figura 3. En el sentido estadístico, los valores de los parámetros de suelo tienen una distribución normal y si se toma un gran número de muestras, la distribución de frecuencia de las muestras tendría forma de campana. La mayoría de los valores caería dentro de un pequeño rango agrupado alrededor de la media, y el promedio reflejará la verdadera fertilidad del lote. En la distribución de frecuencia mostrada en la figura 3, los valores altos incrementan la media..... resultando en un valor promedio mayor que el valor de mayor ocurrencia. Cuando el promedio es mayor que el valor de mayor ocurrencia (moda), sobrestima el nivel de fertilidad del lote.

El muestreo convencional de suelo tiende a sobrestimar el nivel de fertilidad del suelo de un lote porque está diseñado para generar un estimado del promedio del lote. Esto se ilustra con los datos de la tabla 1, de un lote muestreado en grilla. El nivel promedio de fósforo (P) es medio (10 ppm), pero 58% del lote tenía valores bajos o muy bajos. El valor promedio de potasio K fue muy alto (192 ppm) y hubiera resultado en una recomendación de cero aplicación cuando, de hecho, 52% del lote estaba en valores donde se espera respuesta a la aplicación.

Categoría	P	K
Promedio ppm	10(M)	192 (VH)
Porcentaje en cada categoría		
Muy bajo	2	0
bajo	56	2
medio	17	23
alto	10	27
muy alto	15	48

**Tabla 1: variabilidad de valores de K y P en un lote en EEUU. (Fixen 1998)**

Identificar la variabilidad espacial de nutrientes en un lote y desarrollar un mapa de aplicación preciso son los aspectos más importantes del manejo sitio específico de nutrientes. Se han utilizado dos enfoques básicos para llevar a cabo aplicaciones de dosis variable de fertilizantes: muestreos en grilla y muestreo dirigido (Doerge 1999). Los mapas de aplicación de P y K se desarrollaron primero usando patrones de grilla amplios. Los valores de suelo entre los puntos de la grilla debían ser estimados, generalmente utilizando técnicas de interpolación como krigging o interpolación inversa. Investigadores determinaron que la densidad de muestreo debe ser menor a 1 muestra por hectárea para muestreos de rutina, pero, a veces son necesarias una muestra cada media hectárea para reflejar con precisión los niveles de P, K y pH.

Los muestreos en grilla han mejorado la precisión de las aplicaciones en comparación con el sistema de muestras compuestas por lote. Las grillas resultaron en zonas con historia de aplicación de estiércol y/o fertilizantes en forma intensiva o donde los patrones de fertilidad de suelo no son predecibles, como por ejemplo en el cinturón maicero Norteamericano. Si embargo, los muestreos en grilla tienen algunas limitaciones técnicas y prácticas (Doerge

1999). Primero y principal, demanda mucha mano de obra y es onerosa, a pesar que los costos se pueden amortizar en varios años en el caso de nutrientes inmóviles, como P y K, que solo necesitan analizarse cada 3 o 4 años. Como segunda medida, el muestreo en grillas no dirigido no tiene en cuenta el conocimiento que posee el productor de su lote por su experiencia o por información de muestreos anteriores. Técnicamente, solo los métodos geoestadísticos más simples son apropiados para lotes que tiene menos de 100 muestras georeferenciadas. La experiencia mostró que la precisión de los mapas interpolados es menor a la deseada y que la mejor técnica de interpolación depende de las características espaciales únicas de los datos, parámetro que no puede ser predecido de antemano.

En un intento de reducir costos y de evitar algunas otras limitaciones del muestreo no dirigido en grillas, productores y técnicos se están volcando hacia esquemas de muestreo dirigido que reconocen factores cuantitativos, cualitativos, históricos e intuitivos que pueden predecir la variabilidad.. Algunas de estas características son estables mientras que otras son variables y cambian con el tiempo. Los ejemplos incluyen:

- Características estables: elevación/topografía, contenido de materia orgánica del suelo, pH, conductividad eléctrica (CE), color del suelo, condición de drenaje, profundidad del subsuelo, nutrientes inmóviles, etc.
- Características variables: datos de monitor de rendimiento, contenido de humedad del suelo, salinidad, aparición de la canopia, densidad de malezas, compactación, etc.
- Características históricas/intuitivas: conocimiento del productor de la productividad general de lote, rotaciones previas, antiguos alambrados o límites del lote, patrones de drenaje, ubicación de antiguos establos o engordes a corral, etc.

La aplicación de estos conocimientos permiten al productor definir zonas de manejo dentro de los lotes que pueden ser muestreadas con mayor intensidad y que proveen la base para mapas de aplicación variable. Se han utilizado con éxito varios enfoques (ej. mapas de suelo, CE, mapas de rendimiento, etc) para delinear zonas de manejo, pero aquí solo discutiremos sobre el paisaje.

Paisaje – Investigaciones en las praderas canadienses (Wally et al 2000) y en las Grandes Planicies del Norte en EEUU (Franzen y Kitchen 1999) demostraron una relación entre posición en el paisaje y algunos nutrientes, especialmente nitrógeno (N). En las praderas canadienses la variabilidad más pronunciada ocurre en terrenos ondulados donde los rendimientos son reducidos en las lomas comparados con los rendimientos en los bajos. El gradiente de rendimiento resulta de la redistribución de suelo y humedad desde las partes altas hacia los bajos. El patrón de movimiento del agua en el paisaje ha sido bien documentado y está controlado por la pendiente y por las propiedades del suelo. Debido al escurrimiento, las lomas están expuestas a menos lixiviación y menor desarrollo del perfil, menor acumulación de materia orgánica, y la formación de tipos de suelo predecible. La redistribución y acumulación de agua en las partes bajas resulta en un mayor desarrollo del perfil, más materia orgánica, pH más bajo, etc., todo lo que contribuye a diferencias en el potencial de producción.

La redistribución de agua no solo afecta a la formación del suelo y sus propiedades sino también impacta anualmente en el potencial de producción. El contenido total de humedad disponible varía según el año, pero típicamente incrementa de la loma a los bajos, resultando en una mayor producción hacia los bajos y diferentes

respuestas a los fertilizantes aplicados. Esto se ilustra con datos de trigo y canola de una localidad en Saskatchewan (Figura 4). Los rendimientos más altos ocurrieron hacia los sectores bajos, y la respuesta al nitrógeno aplicado incrementó desde las partes altas hacia los bajos.

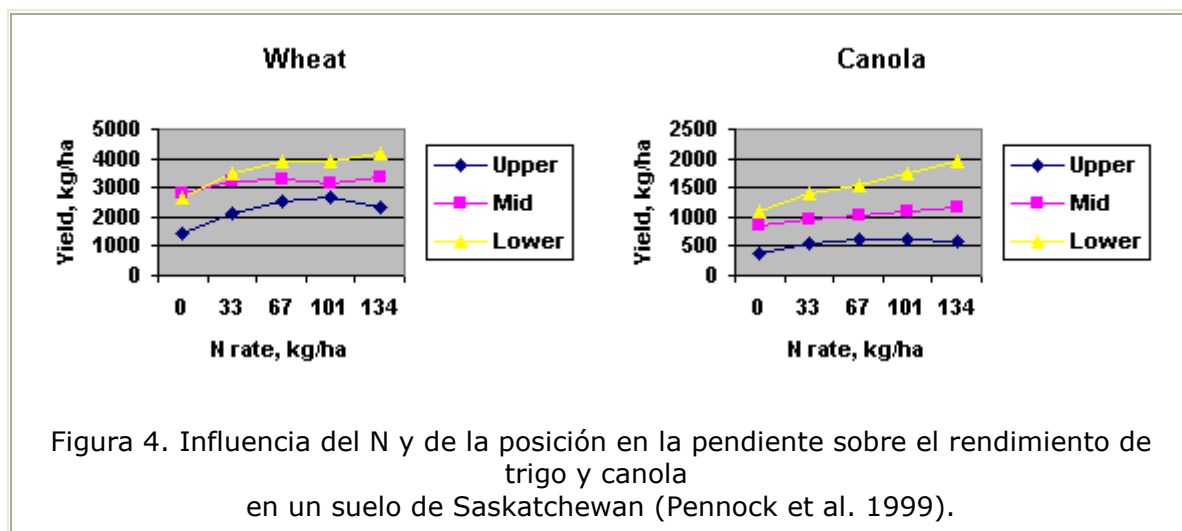


Figura 4. Influencia del N y de la posición en la pendiente sobre el rendimiento de trigo y canola en un suelo de Saskatchewan (Pennock et al. 1999).

El paisaje puede tener un efecto similar sobre los nutrientes inmóviles, como P y K (tabla 2). En este ejemplo, el rendimiento más alto ocurrió en el bajo que recibió la mayor dosis de P, pero los mayores incrementos de rendimiento ocurrieron en la media loma. En este caso los suelos de la media loma mostraron mayor respuesta al P aplicado, aunque los suelos más productivos fueron los del bajo.

La tabla 3 muestra otro ejemplo con trigo en seco en Montana. En este estudio, se aplicaron dosis crecientes de P en franjas de 15 m de ancho, a lo largo de lotes que estaban separados en tres zonas de manejo (loma, media loma y bajo). Donde no se aplicó P, los rendimientos de trigo aumentaron progresivamente desde las lomas hacia los bajos. La aplicación de P incrementó los rendimientos de trigo dentro de cada zona de manejo y como en el testigo, el mayor rendimiento ocurrió en los bajos con la mayor dosis de fósforo. Si embargo, la mayor respuesta ocurrió en las lomas donde la dosis de P mayor incrementó el rendimiento en 564 kg/ha.

	LOMA		MEDIA LOMA		BAJO	
Dosis P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg/ha	Rendimiento	Incremento de rendimiento	Rendimiento	Incremento de rendimiento	Rendimiento	Incremento de rendimiento
	-----kg/ha-----					
0	2.049		2.740		3.655	
15	2.559	510	3.302	562	3.924	269
30	2.198	149	3.531	791	4.142	218

**Tabla 2: Influencia de la posición en el paisaje en la respuesta a la aplicación de fertilizante P en un suelo de Saskatchewan.** (Pennock et al. 1999)

Los investigadores mostraron claramente que la topografía, las unidades de mapas de suelos, u otras propiedades del suelo pueden proveer una buena base para delimitar zonas de manejo. Sin embargo, simplemente definir una zona de manejo no contesta la pregunta de como manejarla mejor o de como y donde se deben variar las dosis de aplicación..... sencillamente indica que ese sector del lote debe ser manejado de forma diferente que otros sectores. La interpretación agronómica de los datos recogidos y desarrollar una correcta recomendación de fertilización para zonas de manejo debe ser manejado sobre una base de sitio por sitio y puede variar de año a año, y deben ser económicas y rentables.

Las preguntas que los productores realizan más frecuentemente sobre el manejo sitio específico, son sobre su rentabilidad. La mayoría de los investigadores coinciden en que la fertilización variable puede incrementar los rendimientos en comparación con la fertilización uniforme, pero si es o no rentable está todavía siendo evaluado. Análisis económicos de la mayoría de los ensayos de campo de las universidades muestran que cultivos de alto valor responden más favorablemente a la fertilización variable que los de bajo valor, porque sus respuestas en rendimiento valen más dinero (Swinten y Lowenberg-DeBoer 1999). Sin embargo, la rentabilidad está también relacionada directamente con la producción total del cultivo, por ende la rentabilidad de la fertilización variable en cultivos de bajo valor se incrementará en sistemas de producción que buscan altos rendimientos.

	BAJO		MEDIA LOMA		LOMA	
Dosis P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg/ha	Rendimiento	Incremento de rendimiento	Rendimiento	Incremento de rendimiento	Rendimiento	Incremento de rendimiento
	-----kg/ha-----					
0	3.716		3.386		3.292	
13	3.783	70	3.749	363	3.433	141
27	3.689	27	3.575	188	3.447	155
40	3.716	0	3.608	222	3.575	282
54	3.810	94	3.695	309	3.729	437
67	3.944	288	3.742	356	3.857	564

**Tabla 3: Influencia de la posición en el paisaje en la respuesta a la aplicación de fertilizante P en un suelo de Montana. (Long et al. 1996)**

En la tabla 4 se pueden observar resultados de un estudio de 3 años en Minnesota, en el que se comparó aplicaciones variables de N y P con aplicaciones uniformes. El ensayo se estableció en un área de 12 has que tenía niveles de P que iban desde muy bajos a altos, materia orgánica desde 2 a 9 % y valores de pH entre 6 y 8. Se aplicaron varias dosis de N y P de manera uniforme en franjas de 366 m de largo a través del lote. La respuesta sitio específica del cultivo indicó que la fertilización óptima variaba desde 0 a 202 kg/N ha y de 0 a 112 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha.

Los resultados en la tabla muestran los ingresos netos por el fertilizante aplicado y comparan la dosis promedio de la aplicación variable con la dosis uniforme, basada en las recomendaciones de la universidad. Nota, los retornos netos por el fertilizante representan el retorno posible total por la aplicación variable que el productor puede esperar, porque fueron calculados a posteriori, ej. los retornos netos óptimos fueron calculados después de haber cosechado el cultivo y la respuesta a las mejores combinaciones de N y P fueron evaluadas. Estos retornos a la aplicación variable son un caso de máxima y no son alcanzables en situaciones de campo porque los enfoques corrientes para determinar las decisiones de manejo correctas son inadecuadas y todavía se están definiendo.

Cultivo	Dosis promedio kg/ha		Beneficio neto del fertilizante, \$/ha		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total
Maíz 97	131 V	55 V	146	101	247
Soja 98	0	73 V	---	119	119
Maíz 99	142 V	73 V	89	183	272
Maíz 99	90 U	67 U	---	---	227

\* V: dosis variable a óptimo económico (0-202 kg N/ha y 0-112 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha/  
 U: dosis uniforme con recomendaciones de universidad

**Tabla 4: tres años de resumen de datos de aplicación sitio específica de N y P. (Malzer 2000)**

Los resultados anteriores muestran que el mejor retorno posible a la aplicación variable en maíz en 1999 fué 272 \$/ha, o 45\$/ha mas que lo que se logró con aplicación uniforme. Sin embargo, esto solo representa el retorno al fertilizante y no incluye el muestreo, mapeo, aplicación y otros costos. De hecho, cuando se consideran todos los costos, un retorno de 45\$ a la aplicación variable no deja mucho margen para la ganancia.

Lo anterior ilustra los desafíos para la aplicación variable de nutrientes. El manejo sitio específico tiene el potencial de mejorar la rentabilidad del productor, pero nuestra habilidad de interpretar correctamente datos agronómicos sitio específicos, hacer recomendaciones apropiadas, y predecir respuestas rentables, está todavía evolucionando. En muchas situaciones, lograr un mejor trabajo de muestreo de suelo e identificar la mayor parte del lote que necesita fertilizante y después aplicar la dosis correcta uniformemente puede ser el manejo de nutrientes más rentable.

La aplicación variable es solo una de las nuevas tecnologías que permitirán ajustar el manejo de nutrientes. Antes de adoptar esta tecnología, los productores deben considerar todos los factores que pueden estar limitando el rendimiento, hacer decisiones de manejo apropiadas, y después evaluar cuidadosamente la rentabilidad de la tecnología de dosis variable bajo su sistema de producción. Más allá del enfoque del manejo de nutrientes, los productores deben administrar para lograr altos rendimientos y así reducir su costo de producción unitario y maximizar su rentabilidad.



## Referencias

*Doerge, T.A. 1999. Site-Specific Management Guidelines: Management zone concepts. SSMG-2, Potash & Phosphate Institute.*

*Fixen, P.E. 1998. Technology in perspective – a customer focus. Fertilizer Industry Federation of Australia, Inc, Conference 'Technology and Training – Transforming Tomorrow. Oct. 18-21, pp. 41-47.*

*Franzen, D.W. and N.R. Kitchen. 1999. Site-Specific Management Guidelines: Developing management zones to target nitrogen applications. SSMG-5. Potash & Phosphate Institute.*

*Long, D.S., G.R. Carlson, and G.A. Nielsen. 1996. Cost analysis of variable rate application of nitrogen and phosphorus for wheat production in northern Montana. p. 1019-1032. In P.C. Robert et al. (ed.) Proc. 3rd Int. Conf. on Site-specific Management for Agricultural Systems. Minneapolis, MN. 23-26 June 1996. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI.*

*Malzer, G. 2000. Maximizing the profitability of site-specific nutrient management in a corn-soybean rotation. Potash & Phosphate Institute/Foundation for Agronomic Research Annual Report.*

*Pennock, D. F. Walley and M. Solohub. 1999. Agronomic and economic assessment of variable rate fertilization. Potash & Phosphate Institute/Foundation for Agronomic Research Annual Report.*

*Swinten, S.M. and J. Lowenberg-Deboer 1999. Site-Specific Management Guidelines: Profitability of site-specific farming. SSMG-3. Potash & Phosphate Institute.*

*Whipker, L.D. and J.T. Akridge. 1999. The evolution continues. Farm Chemicals. Vol. 162 (6): 9-14.*