

La existencia de variabilidad en el tiempo y el espacio de suelos y cultivos y su relación e interacción con el rendimiento y calidad de los cultivos en las chacras es reconocida. El concepto de "agricultura sitio-específica o agricultura de precisión" implica el uso de la variabilidad presente en las chacras de manera de delinear zonas y prácticas agronómicas adecuadas a las mismas (Roel y Terra, 2006).

La agricultura de secano en Uruguay se realiza en un marco de alta variabilidad climática y de ambientes edáficos. Esto determina importantes variaciones de rendimiento entre años y a su vez una gran variación en la respuesta vegetal intra o dentro de chacras. Sin embargo, en general, las chacras agrícolas son manejadas en forma uniforme basadas en promedios que ignoran esta variabilidad, generando ineficiencias económicas y ambientales en el uso de los recursos. En la actualidad existen tecnologías disponibles para detectar, cuantificar, georeferenciar, analizar, relacionar y manejar esa variabilidad.

Para justificar un programa de manejo sitio-específico es necesario que se cumplan tres requisitos: a) la existencia de importante variabilidad en factores que influyen la productividad de los cultivos; b) la identificación y cuantificación de las principales causas de la variabilidad de estos factores y; c) el conocimiento científico-agronómico que permita utilizar la información recolectada para el logro de un beneficio productivo, económico o ambiental (Plant, 2001).

Factores que afectan la variabilidad de rendimientos dentro de chacras

En nuestro país varios trabajos han procurado identificar las principales fuentes de variación en el rendimiento de los cultivos bajo secano y riego. Así algunos de estos trabajos han tratado de identificar las principales fuentes de variación en trigo (Aunchain y Classen, 1990), maíz (Del Campo, 2006) y arroz (Roel y Firpo, 2006). En el caso de trigo, un estudio de variabilidad realizado en chacra mostró una menor disponibilidad de nutrientes en la parte baja del terreno, que resultó en menor desarrollo del cultivo y menores rendimientos finales. Este comportamiento es común durante el ciclo de los cultivos de invierno y más relevante cuando existen suelos con problema de drenaje interno. En un estudio similar para el cultivo de maíz, la variable posición topográfica en el terreno fue también la más relevante para explicar la variación de rendimientos (Del Campo, 2006). En un análisis que consideraba además el tipo de suelo los rendimientos más altos se obtuvieron sobre suelos Vertisoles ubicados en la loma de la chacra y caían en las posiciones de ladera media y baja debido a cambios en el tipo de suelo obteniéndose rendimientos menores a medida que se hacía más importante el grado de diferenciación textural, expresado como la relación entre el porcentaje de arcilla en el horizonte B y el porcentaje de arcilla en el horizonte A. En el caso del cultivo de arroz, se encontró que variables como la calidad del riego y el control de malezas eran variables de importancia en la variación de los rendimientos dentro de chacras (Roel y Firpo, 2006).

Por otra parte, los factores que explican la variabilidad de rendimientos intra-chacra no necesariamente son iguales para cada situación o explican solamente parte de la variación en los rendimientos (Mallarino et al., 1999; Sawchik y Mallarino, 2008). Estos autores, trabajando en chacras comerciales de Maíz y Soja encontraron que las variables que se correlacionaban significativamente en algunas chacras no lo hacían en otras. En muchos casos además, algunas variables relacionadas con la fertilidad del suelo, como el valor de análisis de suelo, no se correlacionaban con el rendimiento final.

Un hecho a destacar es que en general la asociación entre tipo de suelo y topografía explican una importante variación en los rendimientos de los cultivos en varios trabajos. El rendimiento de maíz está altamente relacionado al agua disponible y más aún durante estaciones de crecimiento con déficit hídrico. Muchos factores que se relacionan con la retención de agua de los suelos, como altos tenores

¹ Ing. Agr. (Ph.D.) Director de Programa Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA.

² Ing. Agr. (Ph.D.) Programa de Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA.

de limo, arcilla y C orgánico, tienen fuerte relación con rendimiento y esto es aún más marcado en lugares que han sufrido procesos erosivos severos, que ha removido la capa superficial de suelo (Kaspar et al., 2003). Las precipitaciones durante el período de crecimiento muchas veces interactúan con los atributos del terreno y las propiedades del suelo influenciando los rendimientos de grano. (Timlin et al., 1998; Jaynes et al., 2003; Kaspar et al., 2003). En años con precipitaciones por debajo del promedio, las áreas más altas de las lomas con mayor pendiente y curvatura convexa usualmente tienen menor agua disponible y menor rendimiento de maíz que las áreas más bajas, con menor pendiente y curvatura cóncava (Timlin et al., 1998; Jaynes et al., 2003). Contrariamente, en los años con precipitaciones por encima de los promedios, las áreas con menor grado de pendiente y cercanas a las depresiones pueden ver sus rendimientos reducidos (Jaynes et al., 2003).

Si partimos de la base de que la variabilidad y los factores que explican la variación en el rendimiento de los cultivos son variados, la pregunta inmediata es definir como caracterizamos esta variabilidad para que pueda ser utilizable en un programa de manejo sitio-específico. La variabilidad espacial de suelos y cultivos puede ser cuantificada o estimada a través de varias metodologías. Plant (2001) clasifica estos métodos de medición como: *discretos* (por ej. el muestreo de suelos y plantas en grillas), *continuos* (ej. monitores de rendimiento, sensores de conductividad eléctrica de suelos) y *remotos* (ej. imágenes satelitales).

El uso de las diferentes herramientas disponibles es dependiente de qué pregunta queremos contestar. Si queremos conocer cuales son las variables que están influenciando el crecimiento de las plantas que afectan directamente la variación en rendimiento dentro de chacras existen diversas aproximaciones para cumplir este fin. Quizás la mejor fuente de información sea la construcción e interpretación de mapas de rendimiento. Esto es obvio en la medida que el rendimiento es sin dudas el mejor indicador de la productividad del suelo en las distintas áreas de una chacra (Roel y Terra, 2006). Uno de los problemas principales en el uso de mapas de rendimiento para establecer zonas de productividad superior e inferior es la respuesta vegetal diferencial entre años por factores climáticos o simplemente la respuesta vegetal diferencial de acuerdo a los distintos cultivos presentes en la secuencia agrícola. Así, algunos autores han señalado que para definir zonas estables en rendimiento dentro de chacras es necesario superponer varios mapas de rendimiento (Lark y Stafford, 1998). Para nuestras condiciones por ej. es esperable que las zonas de mayor rendimiento en los cultivos de verano, generalmente ubicadas en zonas topográficas bajas coincidan con zonas de bajos rendimientos para cultivos de invierno (por mayor frecuencia de excesos hídricos). Por tanto la información obtenida con monitores de rendimiento debe ser utilizada con especial cuidado o en todo caso se debería utilizar la información de varios mapas de rendimiento.

¿Qué otros factores pueden estar afectando la variabilidad en el rendimiento?

Sin duda, es lógico pensar que gran parte de la variación observada en los rendimientos dentro de una chacra se deba a propiedades del suelo de tipo estáticas o de relativa estabilidad, poco afectadas en el corto plazo por el manejo. En ese sentido varios autores han destacado la importancia de las propiedades del suelo, la topografía, y atributos del terreno derivadas de ésta, entre otras para explicar la variación de rendimientos de los cultivos (Terra et al., 2006). La ventaja de esta aproximación es que frecuentemente estas variables están asociadas al rendimiento y por otro lado su mapeo debe realizarse en una sola ocasión.

Lo que sí debe quedar claro es que en la mayoría de las situaciones solo una parte razonable de la variación en rendimiento puede ser debidamente explicada y que en la mayoría de los casos son muchos los factores que están interaccionando.

El Concepto de Zona de Manejo

Una vez que se logra identificar la/s principales fuentes de variación en el rendimiento de los cultivos es necesario tomar las decisiones de manejo adecuadas. Estas decisiones de manejo pueden determinar que por ej. en determinada parte de la chacra se opte por cambiar de cultivo, o reducir el área agrícola, y en otros casos variaciones en el uso de los insumos según las zonas. En general mas de un factor está influenciando el rendimiento y por tanto es necesario identificar los factores dominantes que están limitando el rendimiento en las chacras.

Entonces desde este punto de vista el objetivo central de la Agricultura de Precisión es la obtención de *zonas de manejo* definidas por sus factores limitantes de rendimiento para ser manejadas de acuerdo a sus propiedades intrínsecas (Roel y Terra, 2006). Según Plant et al. (2001) los principales requerimientos que las zonas de manejo deben cumplir para ser consideradas como tales son: a) las diferencias de rendimiento entre zonas de manejo debe ser mayor que las diferencias dentro de la zona; b) dentro de determinada zona, los factores limitantes del rendimiento deben ser los mismos. Cuando se lleva este concepto a la práctica es lógico pensar que el número de *zonas de manejo* dentro de una chacra va a estar determinado entre otros por factores como la variabilidad natural, el tamaño de la chacra, o la habilidad del agricultor para manejar esta zona individualmente.

Varias son las fuentes de información utilizables para la generación o delineación de zonas de manejo. Quizás la mas obvia es la utilización de la propia información del rendimiento representada a través de mapas. Su principal limitante es la necesidad de generar varias capas de mapas de rendimiento para obtener zonas estables de alta y baja productividad. Esto es porque zonas de alto rendimiento en años con precipitaciones por encima de lo normal en un cultivo de verano pueden pasar a ser de bajo rendimiento para un cultivo de invierno con el mismo régimen hídrico. Sin embargo puede ser utilizada como una herramienta para chequear la bondad o el ajuste de zonas generadas mediante otro tipo de información.

Históricamente la más tradicional información utilizada es la proveniente del mapa de suelos de la chacra. En general los mapas disponibles contienen información a una escala que no es la requerida en la agricultura de precisión. Es necesario recordar que en el caso de nuestro país la cartografía CONEAT representa información valiosa a una escala adecuada de trabajo. Sin embargo los Grupos CONEAT no son estrictamente unidades cartográficas de Suelos sino que constituyen áreas homogéneas o agrupamientos de suelos definidos por su capacidad productiva. Sin dudas que la fuente de información más utilizable en la construcción de zonas de manejo sería un levantamiento de suelos detallado a nivel predial, pero esto tiene un elevado costo y consume tiempo y recursos. La ventaja para nuestras condiciones es que características tales como la profundidad efectiva del perfil del suelo, su capacidad de almacenaje de agua, sus características de drenaje interno son elementos que a simple vista determinan fuertes impactos en la variación de la productividad de los cultivos. Una de las dificultades mayores para su uso en delineación de zonas de manejo sigue siendo la determinación de los límites precisos entre las Unidades de Suelos.

Por ello es común cada vez más frecuentemente para la delineación de las zonas de manejo el uso y mapeo de otras propiedades estables en el tiempo como los atributos del terreno (elevación, pendiente) junto con propiedades del suelo relativamente estables como por ej. la textura, el contenido de materia orgánica, o más recientemente la conductividad eléctrica (CE). En particular el desarrollo de sensores para la determinación de la conductividad eléctrica a campo en tiempo real ha determinado el interés por utilizar esta metodología sola o en combinación con otros atributos para la delineación de zonas de manejo. Esta propiedad, que representa un tipo de información secundaria está correlacionada positiva o negativamente con varios factores que afectan el crecimiento de las plantas. Entre estas propiedades se destacan: el contenido de humedad del suelo, la profundidad de suelo hasta la capa de suelo con mayor contenido de arcilla, la textura del suelo, entre otras (Corwin and Lesch, 2003). Si bien esta propiedad está influenciada por diversos factores que muchas veces hacen difícil una interpretación causa-efecto con el rendimiento también para determinadas condiciones se han determinado correlaciones significativas con el mismo. Por otra parte la CE provee de información acerca de propiedades del suelo sub-superficiales que son relevantes para el crecimiento de las plantas (Kravchenko et al., 2003). Esta aproximación o sea la utilización de capas de información combinadas de CE, topografía y otras propiedades del suelo puede utilizarse como un camino más rápido para la delineación de zonas de manejo, que luego pueden ser fácilmente chequeadas con la información de mapas de rendimiento de manera de acelerar el proceso de toma de decisiones.

Otras fuentes de información que han sido o pueden ser utilizadas solas o en combinación con las anteriores son el conocimiento propio de la chacra por parte del agricultor o asesor, la fotografía aérea (Fleming et al., 2004) o el uso de imágenes satelitales de alta resolución.

La delineación de zonas de manejo dentro de chacras tiene varios objetivos. Entre otros se destaca: a) reducir o describir adecuadamente la variabilidad en el valor de análisis de suelo; b) facilitar

el uso de herramientas de aplicación variable de fertilizantes; c) entender cuáles son los principales factores que determinan la variación en los rendimientos (Derby et al., 2007).

La Agricultura de Precisión y el Manejo de los Nutrientes

Claramente la aplicación de dosis variable de nutrientes es una de las metas buscadas con la agricultura de precisión. Sin embargo, su aplicación bien realizada es bastante más compleja de lo que parece a simple vista. El enfoque tradicional en fertilidad de suelos está basado en manejar a las chacras como áreas homogéneas y decidir la aplicación de fertilizante basada en el valor de análisis de una muestra compuesta de suelo.

La aparición de nuevas tecnologías como el GPS, o los sistemas de información geográfica (SIG) han permitido mapear correctamente los puntos o lugares de muestreo y estudiar la relación espacial entre los puntos de muestreo y la respuesta al agregado de fertilizante. Uno de los métodos de muestreo de suelos más utilizado en Agricultura de Precisión para describir la variación espacial de los parámetros de fertilidad es el muestreo en grillas. Este tipo de muestreo que resulta de la superposición de una figura geométrica (cuadrado, rectángulo) a una chacra tiene dos variaciones importantes: a) el método de la grilla-celda, en donde se realiza una muestra compuesta de toda la celda o b) la grilla-punto en donde la muestra compuesta se obtiene de tomas alrededor del centro de la celda. Independientemente del tipo de muestreo seleccionado este método tiene una gran debilidad que es definir el tamaño de celda apropiado para cada chacra. Varios autores han estudiado este aspecto y concluyen que en general el tamaño de la celda de muestreo no debería ser mayor a 0.4 ha para representar en la mayoría de los casos la variabilidad en la fertilidad del suelo (Mallarino y Wittry, 2004; Sawchik y Mallarino, 2007). Es de destacar que estos resultados fueron obtenidos en suelos con valores altos de análisis (en general en el rango de suficiencia o por encima de éste) y en donde ya existe una variabilidad generada por factores de manejo (causada en muchos casos por la propia aplicación de fertilizantes). Cabe destacar que en estos y otros trabajos se ha utilizado este método para evaluar la disponibilidad de nutrientes no móviles o poco móviles como P y K. Resulta claro que este tamaño de celda es muy poco práctico y la realidad muestra que los productores realizan un muestreo mucho menos intenso (1 muestra / 1.5 -2 ha). El resultado de esto es que en realidad en las zonas húmedas del cinturón maicero americano las recomendaciones de fertilización variable no serían las más adecuadas.

Claramente entonces existen factores económicos y de practicidad que hacen que el muestreo en grillas tampoco parece ser una solución en nuestras condiciones. Como alternativa se ha propuesto el muestreo dirigido o basado en zonas de manejo determinadas en base a información de mapas de rendimiento, topografía, CE. El uso de zonas de manejo basadas en el rendimiento de los cultivos tendría sentido porque pueden tener una asociación directa con la disponibilidad de nutrientes y con la remoción por parte de los cultivos. Sawchik y Mallarino (2007) utilizaron un muestreo de grilla de alta densidad (0.10-0.25 ha) para simular el comportamiento de un muestreo en zonas basadas en propiedades como elevación o CE. En general las zonas de manejo delineadas mediante el uso de estas variables presentaron una correlación significativa con el rendimiento. Sin embargo, los valores promedio de análisis de P y K en muchos casos no diferían entre zonas y raramente se observó una respuesta diferencial en rendimiento a estos nutrientes entre las zonas delineadas.

Para nuestras condiciones, en donde la variación en el tipo de suelos y topografía dentro de chacras es generalmente importante, y los valores de análisis de suelo se encuentran en general por debajo o cerca del rango de suficiencia, la información de mapas de rendimiento, topografía y CE podría ser utilizada para establecer un programa de muestreo, análisis de suelo y fertilización variable de P y K. En cualquier caso lo más relevante es que las zonas delineadas tengan también diferencias en la respuesta al agregado del nutriente de interés. Para avanzar en esta aproximación es necesario conducir experimentos simples en fajas a escala de chacra que utilicen una dosis fija del nutriente que se pretende estudiar y estas fajas deben a su vez atravesar la dirección de mayor variabilidad.

Referencias

- Ahunchain, M. y M. Claasen. 1990. Causas de variabilidad de rendimiento en trigo. Tesis Fac. Agronomía (UdelaR).
- Corwin, D.L., and S.M. Lesch. 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles and guidelines. *Agron. J.* 95:455-471.
- Del Campo, B. 2006. Factores que afectan la variabilidad intra-chacra de rendimientos en maíz. Tesis Fac. Agronomía (UdelaR), 70 pp.
- Derby, N.E., Casey, F.X.M., and D.W. Franzen. 2007. Comparison of nitrogen management zone delineation methods for corn grain yield. *Agron. J.* 99:405-414.
- Fleming, K.L., D.F. Heermann, and G. Westfall. 2004. Evaluating soil color with farmer input and apparent soil electrical conductivity for management zone delineation. *Agron. J.* 96:1581-1587.
- Jaynes, D. B., Kaspar, T.C., Colvin, T.S., and D.E. James. 2003. Cluster analysis of spatiotemporal corn yield patterns in an Iowa field. *Agron. J.* 95:574-586.
- Kaspar, T.C, Colvin, T.S., Jaynes, D.B., Karlen, D.L., James, D.E., and D.W. Meek. 2003. Relationships between six years of corn yields and terrain attributes. *Precision Agriculture* 4:87-101.
- Kravchenko, A.N., Thelen, K.D., Bullock, D.G., and N.R. Miller. 2003. Relationship among crop grain yield, topography, and soil electrical conductivity studied with cross-correlograms. *Agron. J.* 95:1132-1139.
- Lark, R.M., and J.V. Stafford. 1998. Information on within-field variability from sequences of yield maps: multivariate classification as a first step for interpretation. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 50:277-281.
- Mallarino, A.P., Oyarzabal, E.S., and P.N. Hinz. 1999. Interpreting within-field relationships between crop yields and soil and plant variables using factor analysis. *Precision Agriculture* 1:15-25.
- Mallarino, A.P., and D.J. Wittry, 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.
- Plant, R.E. 2001. Site Specific Management: the application of information technology to crop production. *Computer and Electronics in Agriculture* 30:9-29.
- Roel, A. y H. Firpo. 2006. Agricultura de Precisión en Uruguay. *In: Agricultura de Precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable.* PROCISUR, 246 pp.
- Roel, A. y J. Terra. 2006. Muestreo de Suelos y factores limitantes del rendimiento. *In: Agricultura de Precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable.* PROCISUR, 246 pp.
- Sawchik, J., and A.P. Mallarino. 2007. Evaluation of zone soil sampling approaches for phosphorus and potassium based on corn and soybean response to fertilization. *Agron. J.* 99:1564-1578.
- Sawchik, J., and A.P. Mallarino. 2008. Variability of soil properties, early phosphorus and potassium uptake, and incidence of pests and weeds in relation to soybean grain yield. *Agron. J.* 100:1450-1462.
- Terra, J.A., Shaw, J.N., Reeves, D.W., Raper, R.L., van Santen, E., and P.L. Mask. 2006. Soil management and landscape variability affects field-scale cotton productivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:98-107.
- Timlin, D.J., Pachepsky, Ya., Snyder, V.A., and R.B. Bryant. 1998. Spatial and temporal variability of corn grain yield on a hillslope. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:764-773.