

MANUAL DE AGRICULTURA, DE PRECISIÓN



PROCISUR

Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico
Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur

Argentina
Bolivia
Brasil

Chile
Paraguay
Uruguay



MANUAL DE AGRICULTURA, DE PRECISIÓN

Editores:

Evandro Chartuni Mantovani
*Empresa Brasileira de Pesquisa
Agropecuaria (EMBRAPA)*

Carlos Magdalena
*Instituto Nacional de Tecnología
Agropecuaria (INTA)*

**Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico
Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur**

Argentina : Chile : 
Bolivia : Paraguay :
Brasil : Uruguay :

1.5. Muestreo para mapeo y manejo de la fertilidad del suelo

Álvaro V. Resende y Antonio M. Coelho

Álvaro V. Resende

Investigador en Fertilidad del Suelo y Fertilización,
Embrapa Maíz y Sorgo

alvaro.resende@embrapa.br

Antonio M. Coelho

Investigador en Fertilidad del Suelo y Fertilización,
Embrapa Maíz y Sorgo

antoniomarcos.coelho@embrapa.br

Introducción

Los atributos de fertilidad química, física y biológica del suelo expresan gran variabilidad espacial y temporal e influyen en el potencial productivo en los ambientes agrícolas. Paralelamente, el manejo de la fertilización constituye uno de los principales condicionantes de la productividad de los cultivos. Una buena caracterización edáfica, con utilización frecuente de análisis de suelo, es el procedimiento básico para orientar la toma de decisiones en el gerenciamiento agronómico de los cultivos en la agricultura moderna.

En ese contexto, la agricultura de precisión busca un mayor grado de detalle en la información sobre las condiciones del suelo para fomentar decisiones de manejo acertadas. Dentro de las aplicaciones de agricultura de precisión, los muestreos georreferenciados de suelos permiten mapear las variaciones de fertilidad dentro de las

áreas cultivadas y definir intervenciones de manejo localizado (o sitio-específico), que procura optimizar el uso de correctivos y fertilizantes por medio de aplicaciones a dosis variable de acuerdo con la demanda local del cultivo. Tales muestreos también sirven para la adopción de siembra a dosis variable de los cultivos anuales.

En el muestreo tradicional, normalmente, una o pocas muestras son tomadas para representar la condición media del suelo en las chacras de cultivos de una propiedad. En el caso del muestreo georreferenciado, al disponer de información basada en un número mayor de muestras del suelo representadas en forma de mapas de fertilidad, ya desde el principio el agricultor se beneficiará de tener un mejor entendimiento sobre las condiciones de su cultivo. Sin embargo, una muestra georreferenciada mal hecha podrá afectar negativamente no solo el manejo del suelo sino también las demás etapas y aplicaciones de la agricultura de precisión, pues distorsiones en los mapas de atributos del suelo pueden hacer que todas las prácticas relacionadas al cultivo realizadas en la chacra estén desconectadas de la variabilidad real existente en ese ambiente.

En este apartado se abordan los criterios, aspectos prácticos y procedimientos relativos al proceso de muestreo de suelo para fines de agricultura de precisión, con énfasis en la caracterización de la variabilidad espacial de la fertilidad de los suelos sobre el cultivo de especies anuales.

Integración entre principios geostatísticos y viabilidad operacional

En el manejo de la fertilidad del suelo a través de la agricultura de precisión, generalmente el terreno se subdivide de acuerdo a un muestro en

cuadrículas regular (regular grid) con determinado tamaño de trama, de modo de efectuar un muestreo sistemático con puntos georreferenciados.

La asociación con las coordenadas geográficas posibilita interpolar espacialmente los resultados de los análisis de suelo del conjunto de muestras extraídas y generar mapas que representen la variabilidad de los atributos de interés. Una vez obtenidos los productos de las interpolaciones – por ejemplo mapas de disponibilidad de potasio y de saturación basados en el suelo–, es posible elaborar otros mapas que contengan la indicación (prescripción) de las dosis de fertilizantes y correctivos necesarios en diferentes partes de la chacra. Equipos de aplicación disponibles en el mercado (fertilizadoras) presentan dispositivos electrónicos que reconocen los mapas de prescripción y mecanismos automáticos que ajustan las dosis de los productos a medida que se aplican en el área a ser manejada a dosis variable.

Los datos obtenidos con muestreos georreferenciados para el mapeo de la fertilidad del suelo deben ser procesados y validados según los principios geoestadísticos, y los mapas deben ser manipulados y acabados a través del SIG. Se requiere la recolección de cierto número de muestras para que los datos puedan ser analizados geoestadísticamente de modo de obtener mapas confiables.

Es importante destacar el nivel de detalle con el cual se va a trabajar, que está directamente relacionado con la densidad del muestreo. Respetando los principios de la geoestadística, se pueden obtener buenos mapas con cerca de 50 puntos de muestreo georreferenciados en el área a ser mapeada. Esa referencia puede ser aplicada a chacras de diferentes tamaños. Así, chacras con dimensiones superiores a 250 hectáreas (comunes

en la región de El Cerrado en Brasil) podrán contar con un número razonable de muestras, incluso utilizando muestreos de cuadrículas poco densos, con tamaño de cuadrícula de área superior a 4 hectáreas. Obviamente, manteniendo los 50 puntos de muestreo en chacras de menor dimensión, habrá densificación del muestreo en cuadrículas, lo que repercute positivamente en la calidad de los mapas generados y resultará en mayor confiabilidad para los fines agronómicos pretendidos.

La condición principal que viabiliza el uso de un determinado tamaño de cuadrícula es que los datos derivados del muestreo presenten dependencia espacial. O sea, que exista correlación entre el valor de un atributo muestreado en un lugar con los valores de ese atributo en puntos cercanos en el muestreo en cuadrículas, de modo de permitir estimar datos para los lugares no muestreados por medio de la interpolación y, así, generar un mapa representativo de la variación espacial de dicho atributo en el campo. Lógicamente, cuanto mayor es el tamaño de la cuadrícula, mayor será la distancia entre los puntos de muestreo y menor el grado de similitud entre los valores medidos. A partir de cierta distancia, deja de existir cualquier correlación entre ellos, y deja de ser posible detectar dependencia espacial.

Sobre muestreo de cuadrículas también se puede ver el apartado 3.1. Tecnología de precisión para gestión de nutrientes

Algunas investigaciones realizadas en Brasil para la definición del tamaño de la cuadrícula del muestreo en cuadrículas, han indicado la necesidad de un gran número de puntos de muestreo para poder identificar mejor la variabilidad del suelo en los cultivos (Machado et al., 2004,

Resende et al., 2006; Gimenez & Zancanaro, 2012). En un Latossolo de El Cerrado de Goiás, Resende et al. (2006) estudiaron cuadrículas de muestreo en una chacra de 97,5 hectáreas, considerando tamaños de cuadrícula variando de 0,25 a 9,0 hectáreas. Para cuadrículas de muestreo de hasta 4 hectáreas, la generación de mapas respetando los principios de la geoestadística (obteniendo dependencia espacial) fue posible para los atributos de materia orgánica,

potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg). La Figura 1 ilustra la situación verificada para el potasio. En el caso del fósforo (P), se obtuvo dependencia espacial solamente cuando se utilizó el muestreo más denso, con una cuadrícula de 0,25 hectáreas. La literatura brasilera ha comprobado que, por regla general, los atributos de textura, materia orgánica, pH, potasio, calcio y magnesio presentan mayor continuidad espacial que el fósforo y los micronutrientes. O sea, para estos últimos hay

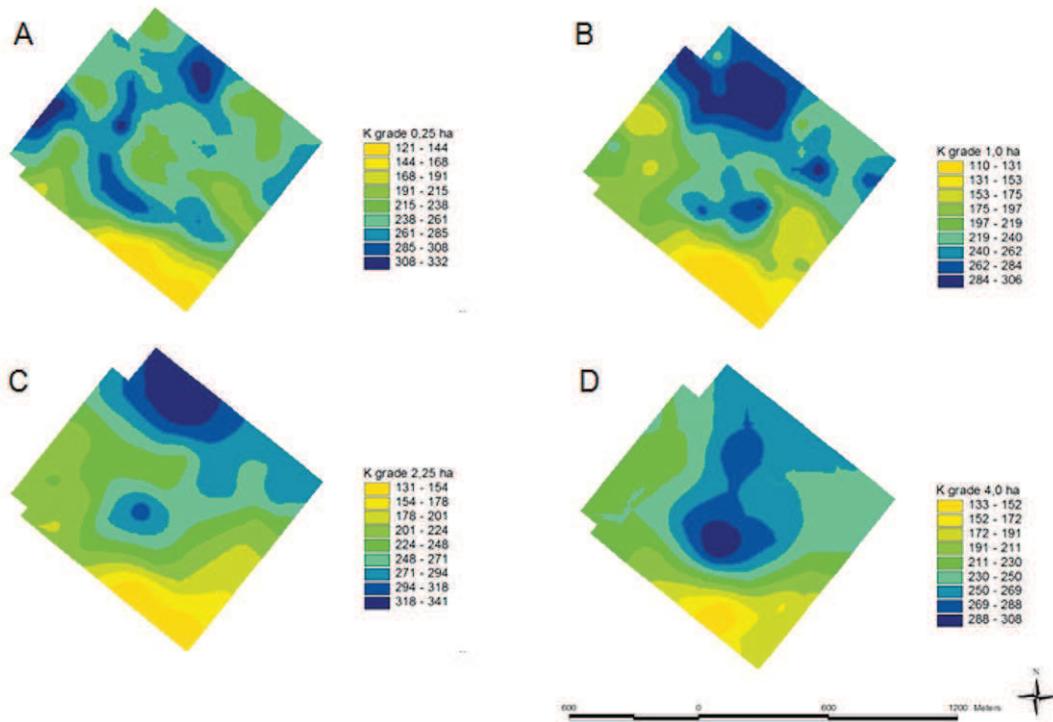


Figura 1. Mapas de niveles de potasio (mg dm^{-3}) en el suelo, obtenidos a partir de muestreo en grillas con cuadrículas de 0,25 ha (A); 1 ha (B); 2,25 ha (C); y 4 ha (D). Nótese que la conformación de las regiones de mayor y menor disponibilidad del nutriente se modifica según la densidad del muestreo. (Fuente: Adaptado de Resende et al., 2006)

mayor probabilidad de no encontrar dependencia espacial en muestreos poco densos.

La recomendación del tamaño de la cuadrícula para muestreo de suelos varía en función de la resolución deseada (“precisión” del mapeo) asociada a costos. Cuadrículas más densas proporcionan mayor confiabilidad de los mapas, pero aumentan la necesidad de mano de obra y el número de muestras a ser extraídas, lo cual se refleja en el gasto de análisis de suelo y en el costo final del manejo con agricultura de precisión.

Debido a los elevados costos de muestreo y de análisis de fertilidad, existe dificultad en armonizar el rigor geoestadístico con la viabilidad económica y operacional para la caracterización de la fertilidad del suelo en escala comercial. La necesidad de compatibilización técnica y económica está siendo considerada y, actualmente, la mayoría de las empresas prestadoras de servicios de agricultura de precisión en Brasil adoptan muestreos en cuadrículas con tamaños de cuadrícula de 1 a 4 hectáreas. Hasta hace pocos años, aún se trabajaba con cuadrículas con área por encima de las 5 hectáreas y, algunas veces, arriba de 10 hectáreas en chacras de gran extensión.

Sin embargo, esa elección debe ser criteriosa y, sin duda, la utilización de muestro en cuadrículas más densas, por ejemplo con cuadrícula de 1 hectárea, es recomendable al iniciarse en la agricultura de precisión y también de forma interpolada con muestreos menos densos, mejorando el diagnóstico de la evolución del cultivo frente a las intervenciones a lo largo del tiempo. Al ponderar los costos, es preciso considerar que, generalmente, la información obtenida de los mapas de fertilidad puede utilizarse por un período de hasta tres años. Otro aspecto importante es que el muestreo geo-

referenciado del suelo debe resultar en mayor eficiencia del uso de correctivos y fertilizantes, y así puede llevar a la reducción en el gasto global de esos insumos.

Pre-requisitos para un muestreo representativo

La ocurrencia de variaciones de productividad dentro de un área de cultivo es el supuesto básico que justifica trabajar con agricultura de precisión. La cuestión clave es: delimitar la ubicación de esas variaciones e identificar sus causas, para entonces definir la mejor estrategia de manejo para cada lugar. La variabilidad del suelo detectada en una chacra precisa ser agronómicamente relevante, a fin de que justifique el manejo localizado, evitando que se realicen intervenciones diferenciadas y por tanto inocuas o innecesarias. En este sentido, se demandan técnicas que permitan optimizar el esfuerzo del muestreo, manteniendo la confiabilidad en la recomendación del manejo específico del lugar.

Teniendo en cuenta la eficiencia del proceso de muestreo del suelo para la agricultura de precisión, esta operación no debe limitarse a la determinación de contornos georreferenciados de la chacra y la sobre posición de un muestreo en cuadrículas pre-definido por medio de un programa informático, argumento comúnmente utilizado por los proveedores de servicio. Si el objetivo de utilizar agricultura de precisión es detallar el diagnóstico de la fertilidad del suelo, se deberían asociar procedimientos adicionales de caracterización de chacras para orientar mejor la etapa de muestreo. Sobre todo cuando se trata de un área extensa, otros tipos de información georreferenciada pueden ser importantes para orientar su subdivisión

en partes más homogéneas, que deberán ser muestreadas y mapeadas aisladamente, en caso de que sea conveniente.

Así, aspectos normalmente observados por el muestreo tradicional también son válidos para el muestreo georreferenciado. Las diferencias de color del suelo, de cobertura vegetal, el histórico de su uso anterior (incluido el histórico de eventual erosión/degradación), de textura, de relieve y de drenaje, acostumbra tener implicaciones sobre la fertilidad del suelo y el potencial productivo a lo largo de las áreas de cultivo, lo cual sugiere la necesidad de una estratificación previa en sub-ambientes.

Mapas de clasificación de suelos, imágenes satelitales, fotografías aéreas, índices de vegetación determinados por medio de sensores específicos y otras formas de adquisición remota, permiten identificar patrones contrastantes que pueden utilizarse para identificar sub-ambientes que debe tener el suelo muestreado y mapeado de manera individualizada. Sensores de conductividad eléctrica, de pH y de materia orgánica han venido siendo utilizados para la detección de zonas de suelo contrastante en la agricultura comercial en algunos países, pero aún requieren estudios para su validación y calibración de acuerdo a las condiciones de suelos tropicales.

Un aporte de gran relevancia para la delimitación de zonas homogéneas para el muestreo direccionado del suelo es la identificación de sub-áreas de productividad diferenciada dentro de las chacras. El registro de datos de productividad realizado con sensores insertados en las cosechadoras exige su posterior procesamiento pero, dada la cantidad de mediciones realizadas –cerca de un registro cada dos segundos–, el mapa de

rendimiento debidamente generado constituye información extremadamente detallada y confiable.

Una secuencia de datos de productividad obtenida luego de tres o más zafas con diferentes cultivos, puede ser relativizada e integrada en un único mapa, revelando sub-ambientes estables a lo largo del tiempo que presenten potencial productivo distinto. Además de ser útil para orientar el muestreo del suelo y la aplicación a dosis variable, ese tipo de información abre la perspectiva de que se apliquen otros enfoques de agricultura de precisión, tales como: fertilización basada en la exportación de nutrientes en la cosecha y siembra a dosis variable. El cultivo de maíz acostumbra expresar con mayor claridad las diferencias de potencial productivo entre chacras. En las mismas condiciones, la soja, más rústica y con capacidad de compensar limitaciones ambientales, tiende a exhibir menor amplitud en las mediciones de productividad.

El conocimiento histórico del uso y de eventuales variaciones en el manejo del suelo y de los insumos en diferentes partes del campo es un aspecto imprescindible en la estratificación de sub-ambientes para el muestreo individualizado. Áreas que actualmente forman una única chacra, pueden haber sido abiertas para el cultivo en distintas épocas. El uso de cal y fertilizantes por períodos de tiempo diferentes crea “impresiones digitales” en el suelo que no pueden ser “ocultadas” por el manejo más reciente, induciendo a la formación de zonas con fertilidad diferencial. Para identificar ese tipo de situación, es fundamental la interacción con el productor o con personas que están directamente vinculadas al día a día de la conducción de las chacras cultivadas. Incluso a partir de observaciones empíricas, ellos pueden auxiliar mucho en la

interpretación de los mapas de rendimiento y en la toma de decisiones para el manejo localizado en diferentes partes del campo.

En definitiva, criterios basados en características topográficas del campo, color del suelo, atributos físicos, profundidad del suelo, espesor del horizonte A, drenaje, datos de adquisición remota, mapas de rendimiento, mapas de conductividad eléctrica, histórico del uso, además de criterios unificados, pueden ser utilizados para orientar la delimitación de sub-ambientes para muestreos de interés. Esa estrategia debe buscarse siempre con el fin de mejorar el manejo de la fertilidad del suelo a través de la agricultura de precisión.

Procedimientos en el muestreo georreferenciado

Un conjunto de acciones debe ejecutarse en forma planificada, para obtener un buen muestreo del suelo para fines de agricultura de precisión. Se pueden utilizar varios métodos para identificar, caracterizar y entender la variabilidad de los atributos de los suelos, pero el proceso que ha sido mayormente utilizado para el muestreo sistematizado y el mapeo intensivo del suelo, consiste en el establecimiento de un muestreo en cuadrículas regularmente distribuidas en el campo (Figura 2), lo cual permite el procesamiento geoestadístico e interpolar posteriormente los datos de análisis de suelo para generar los mapas de diagnósticos de fertilidad.

El procedimiento ilustrado en la Figura 2 cumple con los criterios geoestadísticos, pero puede cuestionarse en cuanto a la representatividad de las muestras frente a los intereses agronómicos. Muchas veces, cada cuadrícula del muestreo tiene una gran área de superficie, comúnmente más de

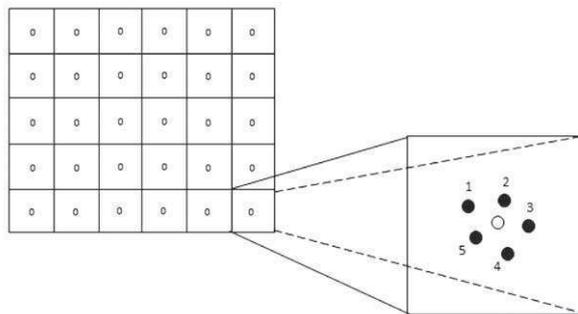


Figura 2. Esquema ilustrativo de un muestreo en cuadrículas regular. En detalle, lugares de recolección de muestras simples en las cercanías (3 a 6 metros) del punto central de la cuadrícula. (Fuente: elaboración Álvaro Resende)

1 hectárea, y la extracción de suelo solamente en las cercanías (3 a 6 metros) del punto central, lo que suscita dudas sobre la efectividad del muestreo así ejecutado. O sea, el status de un determinado atributo del suelo en la cuadrícula puede no estar bien representado en la muestra puntual que generará el valor a ser interpolado en relación a otros puntos relativamente distantes, localizados en cuadrículas vecinas. Un intento de revertir esa posible distorsión consiste en extraer muestras simples a lo largo de una trayectoria de desplazamiento del muestreo, de modo de distribuir los lugares de recolección en un área mayor dentro de la cuadrícula, en diagonal o en zig-zag, de acuerdo con las opciones que se muestran en la Figura 3. Generalmente, esa forma de muestreo ha sido económicamente viable para el manejo de la fertilidad del suelo con aplicación de correctivos y fertilizantes a dosis variable.

Los procedimientos que van desde el muestreo georreferenciado del suelo hasta las aplicaciones de nutrientes a dosis variable representan los servicios de agricultura de precisión más amplia-

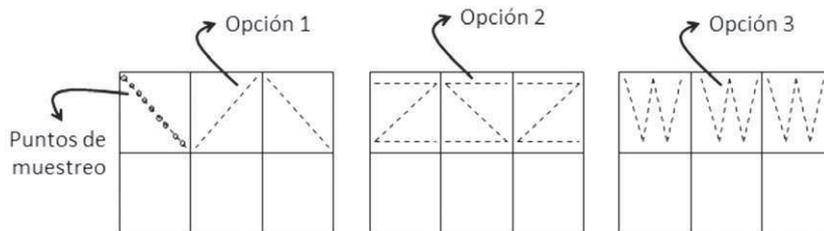


Figura 3. Esquema ilustrativo de algunas opciones de desplazamiento utilizadas por proveedores de servicios de agricultura de precisión para la recolección de muestras simples a lo largo de un muestreo en cuadrículas. La identificación de la muestra compuesta está asociada a las coordenadas geográficas del punto central de la cuadrícula. (Fuente: elaboración Álvaro Resende)

mente difundidos entre los agricultores. Empresas especializadas utilizan muestreadores hidráulicos de suelo adaptados en cuatriciclos (Figura 4) o camionetas con GPS para las recolecciones en el campo, procesan los resultados de análisis por medio de programas informáticos de geoestadística y utilizan sistemas de información geográfica (SIG) para producir mapas diagnósticos y de prescripción de insumos, siendo estos reconocidos por los equipos distribuidores de correctivos y fertilizantes a dosis variable.

El muestreo de suelo para aplicar agricultura de precisión normalmente comienza por la obtención, vía GPS, de los contornos georreferenciados de la chacra o, si fuese el caso, de los sub-ambientes a ser mapeados de forma independiente, de acuerdo a lo descrito en el apartado anterior. Una vez definida la densidad de la cuadrícula de muestreo (la cual se recomienda que sea de cuadrículas con área de 1 hectárea o menos para un primer mapeo de fertilidad), la cuadrícula conteniendo los puntos de recolección de suelo es ajustada a los contornos de chacra y trazada utilizándose un programa de navegación y posicionamiento por satélite. En la secuencia, la información de la grilla y de los puntos de recolección georreferenciados son



Figura 4. Muestreador hidráulico tipo broca (foto pequeña) montado en cuatriciclo, equipo comúnmente utilizado en el muestreo georreferenciado del suelo. El GPS es el dispositivo de color blanco acoplado en frente del vehículo, al lado de la caja de almacenamiento de muestras. (Fotos: Álvaro Resende)

transferidos para el GPS y, a partir de entonces, el muestreador puede ir al campo y realizar el muestreo siguiendo las coordenadas geográficas de los respectivos puntos de recolección de muestras simples.

Cada muestra compuesta, referente a una cuadrícula, precisa ser adecuadamente identificada por un código para su envío al laboratorio de análisis. A ese código debe estar asociada la información, como la identificación de la chacra, la profundidad de recolección del suelo y, lógicamente, las coordenadas geográficas del punto central de la cuadrícula, las cuales permitirán el procesamiento de los resultados del análisis del suelo en programas geoestadísticos y SIG.

Para un proceso geoestadístico satisfactorio y para la obtención de mapas más representativos, el ideal es que la chacra sea caracterizada con un mínimo de 40 a 50 muestras compuestas, que representarán 40 a 50 datos georreferenciados para determinar modelos de variabilidad espacial de atributos del suelo en el área. Buenos modelos matemáticos posibilitarán las intercalaciones y estimativos más realistas de valores de los atributos en los lugares muestreados, y generarán mapas más confiables. Es premisa del número mínimo de muestras compuestas puede ser considerada en el momento de la definición de la densidad de la cuadrícula de muestreo. Como el procesamiento de datos georreferenciados de manera deseable exige cierto grado de conocimiento técnico, existen programas informáticos que realizan esa tarea de manera automática, mediante modelos estandarizados. En general, esa es una opción más accesible para los usuarios pero que puede comprometer la calidad de la información obtenida.

Los suelos explorados con cultivos anuales presentan atributos químicos (por ejemplo: pH y disponibilidad de nutrientes) y físicos (por ejemplo: textura y compactación) que varían horizontal y verticalmente. Además de las variaciones pedogenéticas por causa de la influencia de los materiales

de origen y de los factores de formación del suelo, es bien conocida la variabilidad horizontal debida a las diferencias de fertilidad química en las filas de cultivos de siembra directa con fertilización en el surco (Figura 5). De manera similar, la acumulación de nutrientes menos móviles en la capa más superficial del perfil del suelo, crea una estratificación que corresponde a la variabilidad vertical. Así, es importante buscar una mejor definición de los lugares exactos y de la profundidad de recolección de muestras en el campo, de acuerdo con las características e historia de la chacra.

Cuando la posición de las líneas de fertilización del cultivo anterior son visibles, se debe estandarizar la recolección del suelo solamente en las líneas o mantener una proporción fija de muestras simples recolectadas en las líneas (por ejemplo: 1/3 o 1/4 de las muestras simples en la fila). Ese cuidado pretende prevenir el riesgo de ocurrencia de valores muy dispares en los resultados de los análisis (*outliers*), lo que puede perjudicar la calidad del mapeo a ser realizado.

La profundidad de la recolección debe ser definida de acuerdo a las mismas premisas consideradas en el muestreo tradicional. Lo más común es caracterizar la capa de 0 a 20 cm de profundidad. Muestreos estratificados (por ejemplo: 0 a 10; 10 a 20; y 20 a 40 cm de profundidad) pueden ser convenientes para determinadas situaciones en que es necesaria una mejor interpretación de las condiciones de fertilidad a lo largo del perfil del suelo.

En el muestreo tradicional para análisis de fertilidad, el número de muestras simples recomendado para la formación de una muestra compuesta es de 20 a 30, con el objetivo de garantizar una buena representatividad. En la práctica de muestreo para agricultura de precisión, dada la deman-

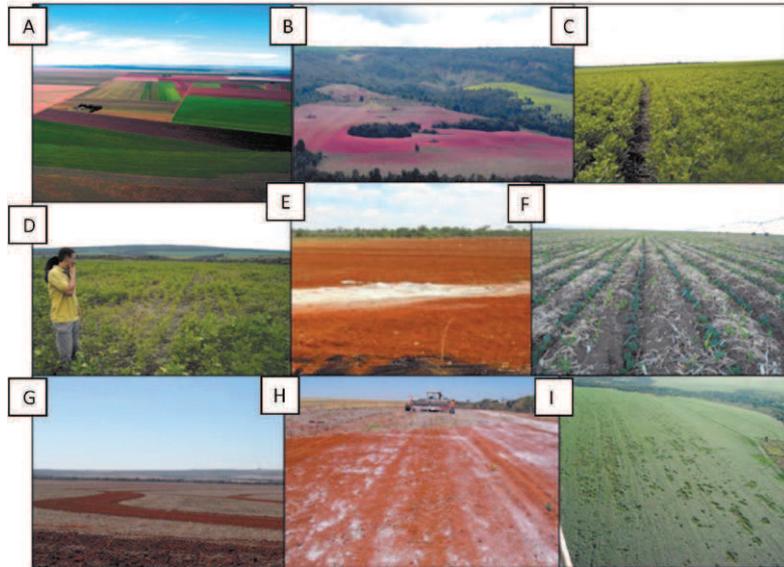


Figura 5. Factores frecuentemente asociados a variaciones puntuales de la fertilidad del suelo y que pueden constituir fuentes de errores o distorsiones en los mapas generados a partir de muestreo georreferenciado: Diferencias del histórico de uso y manejo a corta distancia (A); cambios abruptos de relieve o mineralogía (B); fallas de plantas o focos improductivos donde no existe absorción de nutrientes aplicados en la líneas de siembra (C, D); lugares de depósito de cal en la chacra (E); filas de fertilización que mantienen residuos de fertilizantes (F); bajada de terrazas con exposición de subsuelo (G); aplicación despareja de fertilizantes y correctivos (H); y chacras que promueven la exportación heterogénea de nutrientes (I). (Fotos: A: Marina Vilela; B y I: Luciano Shiratsuchi; C, D, E, F, G y H: Álvaro Resende)

da de mano de obra de mayor intensidad en la recolección en el área a ser mapeada, el número de muestras simples es fijado entre 5 y 10 por cuadrícula. Incluso, una recomendación más criteriosa indica que ese número no debe ser inferior a 10.

Mientras existan opciones de equipamientos con mayor grado de automatización en el proceso de muestreo, en principio, cualquier tipo de muestreador de suelo puede ser utilizado para agricultura de precisión, y es suficiente que sea utilizado justamente con un GPS. Lo importante es que cada muestra enviada al laboratorio pueda ser asociada a las coordenadas geográficas del lugar de recolección.

Las principales determinaciones analíticas que posibilitarán identificar el nivel de fertilidad del suelo en la chacra y que serán la base para las recomendaciones de manejo localizado de correctivos y fertilizantes son: pH; cationes intercambiables (Al, Ca, Mg, K y, eventualmente, Na); P disponible; materia orgánica; y granulometría (arena, limo y arcilla). La determinación de la disponibilidad de micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn y Zn) es bastante útil en el diagnóstico de la fertilidad, aunque todavía no sea común el manejo de micronutrientes con aplicaciones a dosis variable.

La frecuencia de muestreo debe ser tanto mayor cuando más intensiva fuera la utilización del suelo. Cuando se trabaja con dos o más zafas al año, con fertilizaciones para cada cultivo, mayor es la necesidad de monitorear las alteraciones en las condiciones de fertilidad del suelo en la chacra. Así, los muestreos deben ser realizados en intervalos de 1 a 3 años, condicionados por una ponderación costo-beneficio. En este aspecto, se debe tener presente que el punto fuerte de la agricultura de precisión es el perfeccionamiento del proceso decisorio en el manejo de la propiedad agrícola como un todo y no apenas en la aplicación de tecnologías disponibles para el suministro de nutrientes. Desde este punto de vista, parte del retorno de inversión en muestreo del suelo no será inmediato, sino proveniente de las mejoras en las decisiones gerenciales a lo largo del tiempo.

Los demás procedimientos y cuidados requeridos en el muestreo georreferenciado son los mismos tradicionalmente preconizados para la recolección, manipulación y preparación de muestras de suelo para análisis de fertilidad.

Cabe destacar que la descripción del comportamiento espacial por medio de la geoestadística constituye un enfoque eficiente para atributos cuya variabilidad depende esencialmente de procesos naturales (ejemplo: aquellos asociados a las características de formación del suelo, como la textura y la mineralogía) y que tienden a permanecer estables a lo largo del tiempo. Existen aspectos que tornan más compleja la caracterización de la variabilidad del suelo en áreas agrícolas, especialmente en el caso de la fertilidad química (por ejemplo: niveles de los nutrientes). La distribución espacial de lugares que tuvieran alterados los niveles de nutrientes por fallas o manejo nutricional

desparejo (aplicación de cal y fertilizantes) de los cultivos es aleatoria (Figura 5), lo que implica una discontinuidad en el patrón de variabilidad de los nutrientes. Muestras extraídas en lugares con condiciones muy diferentes dentro de la chacra y ninguna expresión en términos de área (outliers), influyen en el procedimiento de interpolación y pueden distorsionar los mapas de fertilidad.

En áreas extensas de cultivos anuales en El Cerrado brasileiro, parte de los muestreos para agricultura de precisión aún son realizados en grillas poco densas, siendo frecuente la definición de tamaños de la cuadrícula por encima de 4 hectáreas. En esta situación, las estimaciones de valores de atributos del suelo para lugares situados entre los puntos de muestreo pueden ser muy diferentes a la realidad, con perjuicio para la calidad del manejo con agricultura de precisión. Para minimizar este problema, Giménez y Zancanaro (2012) sugieren que se utilice un muestreo en celdas, en el cual cada celda corresponde a una cuadrícula del muestreo en grillas donde se recopilan 20 muestras simples recorriendo toda el área. El valor así obtenido para un determinado atributo pasa a constituir el valor medio para el área total de aquella celda y no se hace interpolación. De este modo, se elimina la posibilidad de que una muestra problemática afecte la conformación del mapa diagnóstico, ya que el valor de una celda no está relacionado a los de las celdas vecinas para componer ese mapa.

Consideraciones finales

Con las fertilizaciones (y sus fallas) a cada cultivo, se acumulan interferencias que llevan a modificar los patrones de variabilidad en una misma área a lo largo del tiempo. Así, difícilmente los patrones

espaciales encontrados para los atributos de fertilidad química del suelo en un área sean extrapolables para otras o se mantengan inalterados con el paso del tiempo. De esto se deriva, entonces, que la agricultura de precisión en el manejo del suelo debe volcarse para el monitoreo de chacras en una perspectiva de ajustes continuos a lo largo del tiempo, y utilizarse no solo para muestreos periódicos del suelo, sino también como una herramienta que agregue y permita detallar información sobre la variabilidad espacial y temporal en las áreas de cultivo.

Como lo descrito anteriormente, el mapeo que utiliza muestreo en cuadrículas presenta imperfecciones y los aspectos económicos de este procedimiento podrían inviabilizar la continuidad de la agricultura de precisión en fertilidad del suelo en los modelos actuales, a medida que las ganancias financieras del productor se tornen menos compensadas después de las primeras intervenciones. Es sabido que la productividad en diferentes partes de una chacra depende de las características del terreno (posición en el relieve, tipo de suelo, textura, capacidad de retención de humedad, etc.) que interactúan o influyen en la fertilidad química del suelo. Por lo tanto, un diagnóstico preliminar de las causas de variación de la productividad posibilita orientar el muestreo, reducir el número de puntos de recolección y optimizar costos, además de mejorar la calidad de la información expresada en los mapas de fertilidad y aumentar la confianza en la toma de decisiones sobre el manejo localizado de fertilización.

Raramente se verifica una alta correlación entre un factor de producción aislado, sea edáfico o no, con la productividad. Así, los factores de producción relacionados con la fertilidad del suelo y

manejables con el uso de correctivos y fertilizantes constituyen apenas una parte de los condicionantes de la productividad final de una chacra. Atributos físicos del suelo, como textura, densidad, porosidad y capacidad de almacenamiento de agua, pueden tener gran importancia relativa en la determinación de la productividad, así como otros abióticos y bióticos que no siempre son considerados en la agricultura de precisión. Esos hechos refuerzan la necesidad de trabajar con un enfoque transdisciplinario al aplicar agricultura de precisión, buscando aprovechar mejor su potencial para obtener mayor eficiencia en el gerenciamiento de la propiedad agrícola.