

Conceptos de utilidad para lograr un correcto muestreo de suelos¹

Ramiro Carretero*, Pablo A. Marasas, Esteban Souza, y Agustín Rocha

El muestreo de suelos es el primero de una serie de pasos dentro del proceso que lleva a la recomendación de fertilización y/o corrección de suelos (fuente, dosis, momento y forma). Antecede al análisis de las muestras, la interpretación de resultados y el diagnóstico. Además, de los distintos pasos dentro de este proceso, el muestreo es la mayor fuente de error (Cline, 1944). Se han observado errores de 3 a 6 veces superiores en el proceso de muestreo y acondicionamiento de la muestra que en el análisis de laboratorio, aún con procedimientos de muestreo más precisos que los usados comúnmente a campo.

El error de los análisis realizados en el laboratorio a una muestra de suelo es de baja magnitud. Sin embargo, la relación entre el tamaño de esa muestra (e.g. 1 kg, de la que además se utilizarán unos pocos gramos para el análisis) y el tamaño de la población (e.g. suelo comprendido en 20 cm de un lote de 50 ha = 125 000 000 kg) para la cual queremos estimar el valor de un nutriente, es varios ordenes de magnitud inferior a la existente en otras áreas. Así, esta relación es de, como máximo, 1:125 000 000 mientras que en un análisis de sangre, por ejemplo, esta relación es de aproximadamente 1:500 (10 ml/5000 ml). Esta es una de las cuestiones que convierten al muestreo en un punto crítico para el cual se deben extremar los cuidados, de modo de obtener una muestra representativa del lote o caso que se está estudiando.

El objetivo de este trabajo es presentar y discutir distintos conceptos y puntos críticos del proceso de muestreo de suelos para obtener muestras lo más representativas posible de cada lote o ambiente en estudio.

Metodologías de muestreo

Existen diversas metodologías de muestreo de suelos, la elección de una de ellas dependerá del objetivo que se persigue y, principalmente, de la variabilidad espacial del nutriente a estudiar en el lote o ambiente. En este sentido, la variabilidad es distinta para cada nutriente o variable a estudiar y, a su vez, difiere entre lotes o ambientes. Por una parte, en general, es mayor la variabilidad espacial observada para fósforo (P) (Anghinoni et al., 2003), que para nitrato (NO₃) y la de este mayor a la de carbono orgánico (Mallarino, 2001; Mallarino y Wittry, 2004). Por otra parte, la variabilidad espacial de nutrientes dentro de un lote puede provenir de efectos naturales o de efectos antrópicos.

La **variabilidad natural** generalmente ocurre a gran escala y es debida a diferentes factores como el tipo de suelo y material originario, la posición o elevación en

el terreno (Franzen et al., 2006), áreas con alternancia de anegamiento, etc. Como tal, es factible conocerla y reducir su impacto disminuyendo la variabilidad del resultado obtenido y separando entre zonas homogéneas (Franzen, 2008).

La **variabilidad por manejo (antrópica)** ocurre a gran y pequeña escala y es debida a aplicación previa de fertilizantes, la erosión, y cultivos antecesores, entre otros (Mallarino, 2013). En este sentido, se han documentado aumentos de la variabilidad por la aplicación de fertilizantes residuales y poco móviles en bandas (como los fosfatados), con mayor impacto en lotes bajo siembra directa debido a la ausencia de remoción y mezclado del suelo (Duiker y Beegle, 2006), y mayor aún con aumentos del espaciamiento entre líneas de siembra/fertilización (Anghinoni et al., 2003). A su vez, la variabilidad espacial del Pe (P extractable) de la capa superficial aumenta a medida que aumenta la fertilidad del lote, siendo aún mayor en lotes con más años de agricultura (Mallarino et al., 2006). También existe una acción antrópica que genera variabilidad dentro del área estudiada como las zonas donde se removieron antiguas construcciones, aguadas, montes de sombra o reparo para animales, corrales de encierre, re-apotreramientos, etc. (West et al., 1989; Díaz-Zorita et al., 1998; Gutiérrez-Boem y Marasas, 2005).

La variabilidad suele estar representada por una gran frecuencia de valores (puntos en el terreno) bajos y algunos pocos valores altos, principalmente para el caso de nutrientes poco móviles como el P (i.e.: distribución sesgada o asimétrica, no normal). Esta particular distribución de variabilidad hace que el promedio sea superior al valor más frecuente o mediana. En la mayoría de los casos, la muestra enviada a laboratorio proviene de recolectar y mezclar un determinado número de sub-muestras ("piques") de un mismo lote o ambiente con lo cual todo resultado obtenido de esta muestra representa al promedio de las sub-muestras. Considerando esto, en general, el valor obtenido será superior a la mediana (o valor más frecuente) del lote en estudio (Gutiérrez-Boem y Marasas, 2005; Roberts y Henry, 2001).

Las tecnologías de producción (siembra directa y fertilización en bandas) y la intensificación del agro aplicadas desde hace más de dos décadas en la mayoría de los lotes de la región pampeana argentina, han tenido un gran impacto en la variabilidad y distribución de nutrientes en el espacio, principalmente para nutrientes poco móviles como el P (Duiker y Beegle, 2006). Esto, sumado a la existencia de variabilidad natural, hace

¹ Laboratorio y Servicios Agropecuarios Marasas+Asociados. Buchardo 365, Lincoln, Buenos Aires, Argentina <http://www.laboratoriomarasas.com.ar>

* Autor de contacto. Correo electrónico: rcarrete@agro.uba.ar

necesario conocer las distintas metodologías de muestreo de modo de elegir la más adecuada a cada situación o lote a evaluar. Por ejemplo, para reducir el impacto de líneas de fertilización de P del cultivo anterior, lo aconsejable es tratar de muestrear las líneas de fertilización/siembra de cultivos anteriores en una proporción representativa del área que ocupan tales líneas en el espacio (Ver sección Muestreo en bandas de fertilización fosfatada de cultivo anterior). En el caso de áreas cercanas a montes de reparo o aguadas, zonas donde antiguamente existía una aguada o un corral de encierre, o en áreas donde se hayan removido alambrados, la solución es tratar de detectar tales áreas y excluirlas del muestreo. Estas áreas pueden detectarse mediante la comparación de imágenes satelitales o fotos e imágenes aéreas viejas y nuevas (Chang et al., 2003). A su vez, incrementar el número de sub-muestras (por muestra compuesta) ayudará a reducir el impacto "distorsionante" de estas sub-muestras puntuales con altos valores.

Finalmente, es importante remarcar que, independientemente de la variabilidad, se suelen cometer los siguientes

errores: i) no se toma una cantidad de sub-muestras adecuada, ii) no se mantiene la profundidad de muestreo entre las distintas sub-muestras, iii) no se homogeniza la muestra, iv) se muestrea muy cerca de los alambrados o montes, v) no se conservan adecuadamente las muestras hasta llegar al laboratorio; entre otros. Si bien existen metodologías alternativas y variantes, entre las principales pueden mencionarse las siguientes (**Figura 1**):

- **Al azar simple:** Se toman sub-muestras al azar en diferentes puntos del lote que luego se juntan en una única muestra compuesta.
- **Al azar estratificado (o por ambientes):** Se separan los distintos ambientes o zonas de manejo dentro del lote y se genera una muestra compuesta para cada ambiente. Para la separación de ambientes se utilizan distintas "capas" de información (generalmente geo-referenciada): tipo de suelo, relieve, mapas de rendimiento, imágenes espectrales satelitales, foto-imágenes aéreas, etc.
- **Estaciones (o zonas de referencia) simple:** Solo se toman sub-muestras de distintos sectores

Tabla 1. Metodologías de muestreo de suelos.

Metodología	Distribución de sub-muestras	Cantidad de muestras compuestas	Cantidad de sub-muestras por muestra compuesta ^a
Al azar simple	Grilla sistemática, grilla aleatoria, zig-zag, transecta diagonal, diagonales cruzadas, etc.	1 por lote	Mínimo 25 a 50 ^b (independientemente del tamaño del lote)
Al azar estratificado	Ídem a "Al azar simple" pero para cada ambiente	1 por ambiente	Mínimo 25 ^c (independientemente del tamaño del ambiente)
Estaciones juntas simple	Estaciones de muestreo de 10-15 m de diámetro en zonas representativas del lote	1 por lote	Mínimo 4 estaciones para cada lote (8-12 sub-muestras en cada una) ^d
Estaciones individuales simple	Ídem a "Estaciones juntas simple"	1 por estación	Ídem a "Estaciones juntas simple"
Estaciones juntas estratificado	Ídem a "Estaciones simple" pero para cada ambiente	1 por ambiente	Mínimo 4 estaciones para cada ambiente (8-12 sub-muestras en cada una) ^d
Estaciones individuales estratificado	Ídem a "Estaciones juntas estratificado"	1 por estación	Ídem a "Estaciones juntas estratificado"
Grilla	Grilla punto: sub-muestras dentro de 5-10 m de radio alrededor de cada punto de la grilla – 1 a 2 punto por ha ^{d,e} . Grilla celda: sub-muestras al azar dentro del área conformada por 4 puntos de la grilla. 1 a 2 celda por ha ^{d,e} .	1 por punto (o celda) de la grilla	Entre 8-12 ^d

^a Para más detalle ver Sección 3: Número de sub-muestras

^b El número de sub-muestras depende mucho del tipo de nutriente (siendo mayor el número necesario para obtener representatividad para P que para nitrato, por ejemplo) y, además de la variabilidad particular del lote en estudio (Alvarez et al., 2008)

^c Se considera un número de sub-muestras necesario menor al método al azar simple dado que se muestrearían áreas con mayor homogeneidad (ambientes)

^d Según Franzen y Cihacek (1998)

^e Según (Mallarino, 2001)

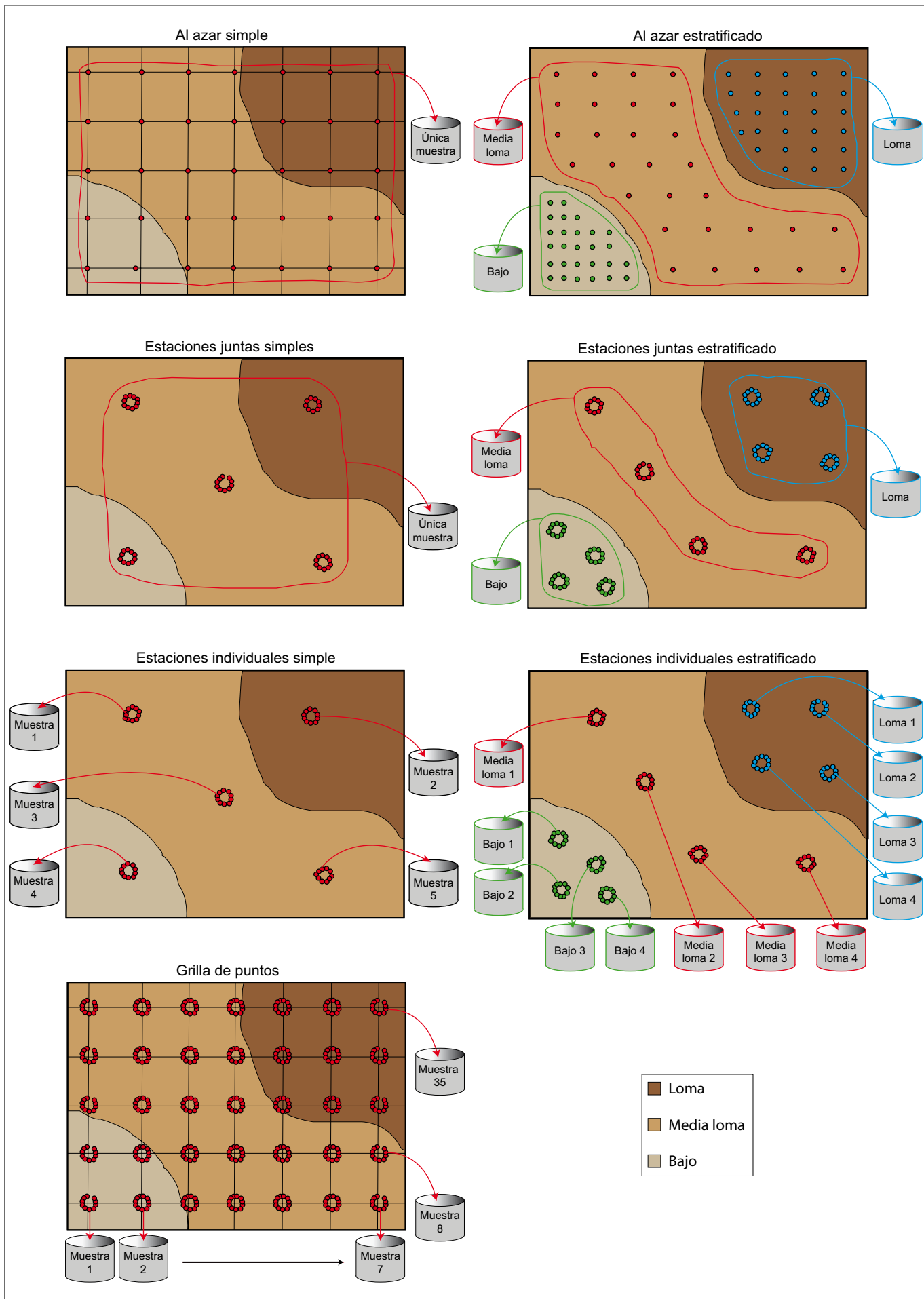


Figura 1. Esquemas de distintas metodologías de muestreo de suelo.

del lote (estaciones de muestreo), considerados representativos del mismo. En cada estación se toman varias sub-muestras.

- Estaciones juntas: Se juntan las sub-muestras de todas las estaciones para componer una única muestra del lote.
- Estaciones individuales: Se genera una muestra compuesta de cada estación.
- **Estaciones estratificado:** Se separan los distintos ambientes del mismo modo que lo indicado para el método "Al azar estratificado" y luego se procede de igual modo que el método "Estaciones simple".
 - Estaciones juntas: Se juntan las sub-muestras de todas las estaciones de un mismo ambiente para componer una única muestra para cada ambiente.
 - Estaciones individuales: Se genera una muestra compuesta de cada estación.
- **Grilla de puntos y grilla de celdas:** Se realiza una grilla de puntos (o de celdas) geo-posicionados y de cada uno de ellos se obtiene una muestra compuesta conformada por varias sub-muestras.

Las distintas metodologías mencionadas varían, principalmente, en la forma de distribuir las sub-muestras en el espacio, la cantidad de muestras compuestas a analizar de cada lote y la cantidad de sub-muestras que componen cada muestra compuesta (**Figura 1, Tabla 1**). Dadas las características particulares de cada metodología y las diferencias entre estas características, cada metodología tiene beneficios y limitaciones, las más importantes pueden observarse en la **Tabla 2**.

El clásico muestreo al azar simple (sub-muestras al azar que componen una única muestra por lote) fue muy útil previo al uso masivo de la siembra directa y, principalmente, de la fertilización en bandas de nutrientes poco móviles como el P. De hecho, lo sigue siendo en aquellos lotes con poca variabilidad espacial de nutrientes, principalmente por su bajo costo. Sin embargo, dada la variabilidad espacial de nutrientes, sumadas al conocimiento cada vez mayor que se tiene de los lotes, nuevos métodos de muestreo y análisis de suelos pueden ser más útiles y precisos. Así, un muestreo al azar estratificado (o por ambientes) mediante el uso de información anexa (relieve, tipo de suelo, mapas de rendimiento, imágenes satelitales, zonas con anegamientos en campañas anteriores, uso previo de distintos cultivos en el mismo lote, etc.) puede ser de mucha utilidad al permitir conocer la variabilidad en lotes con claras diferencias de ambientes (Franzen et al., 2006), más aún si existe la posibilidad (maquinarias y operarios idóneos) de realizar aplicación variable de nutrientes.

Por otra parte, la utilización de Estaciones de muestreo (ya sea a nivel de lote o dentro de ambientes) permite excluir áreas no representativas del lote, trabajando con sectores geo-referenciados que permiten hacer comparaciones más precisas y válidas entre una

campaña y otra. Además, de mantenerse separadas las muestras de cada estación se pueden tener una idea de la variabilidad (sin elevar demasiado los costos), pudiendo incluso descartar estaciones de las que se sospecha que hubo alguna contaminación con una sub-muestra de muy alto valor.

Por último, el muestreo en Grilla permitiría conocer con mucho detalle como varían los nutrientes en el lote (o ambiente) y/o poder descartar muestras que se estima que pudieron contaminarse con alguna sub-muestra de alto valor. Este método tiene un costo mayor dada la intensidad de muestreo y la cantidad de muestras a analizar. Sin embargo, una alternativa para nutrientes poco móviles y relativamente "residuales" como el P podría ser realizar muestreo en Grilla por única vez (o con una frecuencia de 5 años, por ejemplo) y luego, conocida la variabilidad, elegir el método alternativo de muestreo más adecuado.

Muestreo en bandas de fertilización fosfatada de cultivo anterior

Tal como fue comentado, dada la escasa movilidad y la residualidad del P en el suelo, al ser aplicado en bandas y en ausencia de remoción de suelo (i.e. siembra directa), genera gradientes horizontales de concentración. Se registran mayores concentraciones de P en el volumen de suelo circundante a la banda de aplicación disminuyendo de manera exponencial a medida que se alejan de ésta hasta alcanzar un mínimo en el espacio central entre dos bandas de aplicación, siendo esta caída más pronunciada cuanto mayor es la dosis de fertilizante aplicado (Kitchen et al., 1990; Duiker y Beegle, 2006). Esta variabilidad de la concentración de P en el espacio horizontal y a pequeña escala genera imprecisiones en los resultados de análisis de este nutriente.

Para disminuir tal impacto se han sugerido distintas alternativas de muestreo (**Tabla 3**). De no poder identificarse la banda de fertilización del cultivo anterior, Kitchen et al. (1990) sugieren tomar sub-muestras apareadas en sentido perpendicular a las bandas, tomando la primera de estas sub-muestras de manera azarosa y la segunda a una distancia del 50% del espaciamiento entre bandas. Sin embargo, otros autores sostienen que, si el número de sub-muestras es adecuado, el muestreo al azar es suficiente para evitar la sobreestimación del resultado por el efecto de la banda (Tyler y Howard, 1991; citados por García y Picone, 2004). En este sentido, el error que se comete es mayor si se incluye de manera inadecuada que si se excluye el muestreo de la banda, con el agregado de que se estaría sub-estimando la necesidad de fertilización. Duiker y Beegle (2006), a pesar de observar mayor concentración de P sobre la banda de aplicación, sugieren no muestrear sobre dicha banda de cultivos anteriores para evitar sub-estimar las necesidades de fertilización.

Tabla 2. Beneficios y limitaciones de las principales metodologías de muestreo de suelos.

	Al azar simple	Al azar estratificado	Estaciones juntas simple	Estaciones individuales simple	Estaciones juntas estratificado	Estaciones individuales simple	Estaciones juntas estratificado	Estaciones individuales simple	Grilla
Costo de planificación de muestreo (1 = menor costo)	1	2	1	1	2	1	2	2	2
Costo de muestreo	1	2	1	1	2	1	2	2	3
Costo de análisis	1	2	1	3	2	3	2	4	5
¿Requiere contar con información y trabajo previo de oficina?	Solo si se quiere geolocalizar los puntos previo al muestreo	Si: identificación de ambientes y geolocalización de puntos de grillas	Solo si se quiere geolocalizar las estaciones previo al muestreo	Idem "Estaciones juntas simple"	Si: identificación de ambientes y geolocalización de estaciones	Idem "Estaciones juntas simple"	Si: identificación de ambientes y geolocalización de estaciones	Si: identificación de ambientes y geolocalización de estaciones	Si: geo-localización de puntos de grilla
¿Permite conocer variabilidad espacial?	no	si, entre ambientes	no	si (solo a nivel de lote)	si, entre ambientes	si (solo a nivel de lote)	si, entre ambientes	si, entre ambientes y dentro de cada ambiente	si, en detalle para el lote y para ambientes
¿Permite realizar aplicaciones variables de nutrientes?	no	si	no	no	si	no	si	si	si
¿Se puede eliminar o diluir el impacto de puntos con valores extremos de pequeña escala como líneas de fertilización de cultivos anteriores, bosteos de animales, etc?	Incrementando la cantidad de sub-muestras	Incrementando la cantidad de sub-muestras	En cada estación se toman varias sub-muestras lo cual ayuda a diluir cualquier punto "contaminado"	Idem "Estaciones juntas simples" y además, al contar con un dato de cada estación se puede detectar si alguna se contaminó	Idem "Estaciones juntas simples"	Idem "Estaciones juntas simples" y además, al contar con un dato de cada estación se puede detectar si alguna se contaminó	Idem "Estaciones juntas simples"	Idem "Estaciones individuales simple"	En cada punto se toman varias sub-muestras lo cual ayuda a diluir cualquier contaminación. Al contar con un dato de cada punto podría detectarse si alguno se contaminó
¿Se pueden evitar zonas con valores extremos como cercanías a alambrados, montes de reparo, aguadas, etc?	Se debe estar muy atento	Se debe estar muy atento	Es más probable evitarlas que en métodos al azar dado que se eligen solo zonas de referencia	Idem "Estaciones juntas simples" y además, al contar con un dato de cada estación se puede detectar si alguna se contaminó	Idem "Estaciones juntas simples"	Idem "Estaciones juntas simples" y además, al contar con un dato de cada estación se puede detectar si alguna se contaminó	Idem "Estaciones juntas simples"	Idem "Estaciones individuales simple"	Si bien estas zonas son probables de capturar con el muestreo luego podrán identificarse dado que se cuenta con un dato de cada punto
Observaciones	<ul style="list-style-type: none"> Existe el riesgo de que las estaciones elegidas no sean representativas 	<ul style="list-style-type: none"> Existe el riesgo de que las estaciones elegidas no sean representativas 	<ul style="list-style-type: none"> Existe el riesgo de que las estaciones elegidas no sean representativas 	<ul style="list-style-type: none"> Dado que de cada estación se obtiene una muestra compuesta es factible georeferenciarla para realizar su seguimiento en el tiempo 	<ul style="list-style-type: none"> Idem "Estaciones juntas simple" 	<ul style="list-style-type: none"> Dado que de cada estación se obtiene una muestra compuesta es factible georeferenciarla para realizar su seguimiento en el tiempo 	<ul style="list-style-type: none"> Idem "Estaciones juntas simple" 	<ul style="list-style-type: none"> Idem "Estaciones individuales simple" 	<ul style="list-style-type: none"> Dado que de cada punto se obtiene una muestra compuesta es factible georeferenciarla para realizar su seguimiento en el tiempo Permite realizar un mapa del nutriente en estudio mediante interpolación geo-estadística. Muy útil cuando no se tiene ningún tipo de información anexa que pueda indicar variabilidad

Tabla 3. Cantidad recomendada de sub-muestras de la entre-banda por cada sub-muestra de banda para distintos distanciamientos.

Distancia entre bandas (cm)	Cantidad de sub-muestras en entre-banda por cada sub-muestra en la banda	Referencia
30	8	Kitchen et al., 1990
76	20	
17.5 a 19	3	Comisión de Fertilidad de Suelos RS SC (1997) (citada por García y Picone, 2004)
38 a 40	7	
60-80	13	

Número de sub-muestras

La calidad de un muestreo suele evaluarse mediante los parámetros de precisión y exactitud. La precisión indica cuán repetible es el resultado obtenido, mientras que la exactitud indica que tan alejado está el valor encontrado del valor real (Johnson et al., 1983; Swenson et al., 1984). Así, en términos estadísticos, una precisión del 80% y una exactitud del 20% indican que 8 de cada 10 veces que se repita el proceso de muestreo y análisis, el valor encontrado estará dentro de un rango de variación del 20% del valor real.

La cantidad de sub-muestras necesarias para poder estimar con una determinada precisión y exactitud el valor de un nutriente depende fuertemente de la variabilidad de ese nutriente dentro del área que se pretende representar (lote, ambiente, estación o punto de una grilla). Debido a ello, cuanto más homogénea (menos variable) sea el área a representar, menor será la cantidad de sub-muestras a recolectar necesarias para lograr un mismo nivel de precisión y exactitud. Por este motivo, al utilizar métodos de muestreo que se basen en identificar y separar áreas homogéneas dentro del lote (ambientes, zonas o incluso estaciones) es esperable que se necesiten menor cantidad de sub-muestras (por muestra compuesta) para un mismo nivel de precisión y exactitud pretendidos o, dicho de otro modo, que para un mismo número de sub-muestras se incremente el nivel de precisión y exactitud.

La cantidad de sub-muestras necesarias para lograr un determinado nivel de precisión y exactitud se incrementa de manera exponencial a medida que se incrementa la variabilidad (**Figura 2**). Sin embargo, si la exactitud pretendida no es muy "estricta" (i.e. 20%), y para niveles de precisión de hasta 90%, esta podría alcanzarse con 20 sub-muestras aún en lotes con niveles de variabilidad importante (CV mayor a 55%). Contrariamente, si el nivel de exactitud pretendida es mayor (i.e. 10%), la cantidad de sub-muestras necesarias se incrementa de manera importante, siendo de 50 y 80 sub-muestras para precisiones de 80% y 90%, respectivamente (considerando un CV del 55%).

Actualmente, es frecuente encontrar lotes con niveles de variabilidad entre sub-muestras que superan un CV

del 50% (datos propios no mostrados; Alvarez et al., 2008). Incluso, si no se extreman los cuidados durante el muestreo como evitar muestrear en las cercanías de alambrados, cabeceras, aguadas o lugares de reparo, o si con alguna de las sub-muestras se captura un punto sobre fertilizado del cultivo anterior, los niveles de CV pueden superar ampliamente un valor de 100%. Por ello, vuelve a remarcar la ventaja de identificar y separar áreas homogéneas (ambientes o zonas) o bien realizar el muestreo en zonas representativas (ejemplo estaciones) con el objetivo de disminuir la variabilidad e incrementar los niveles de precisión y exactitud de los resultados del análisis (Ver sección de Metodologías de muestreo).

Profundidad

La profundidad a la cual deben extraerse las muestras depende de las características del nutriente o propiedad del suelo que se pretenda evaluar. Así, los nutrientes poco móviles como el P, la materia orgánica (MO), el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y los micronutrientes suelen medirse a partir de muestreos de la capa superior del suelo (0-20 cm). Allí es donde ejercen su mayor efecto sobre el crecimiento del cultivo por ser la capa donde más se concentran (Jobbágy y Jackson, 2000; Jobbágy y Jackson, 2001) y donde se encuentra la

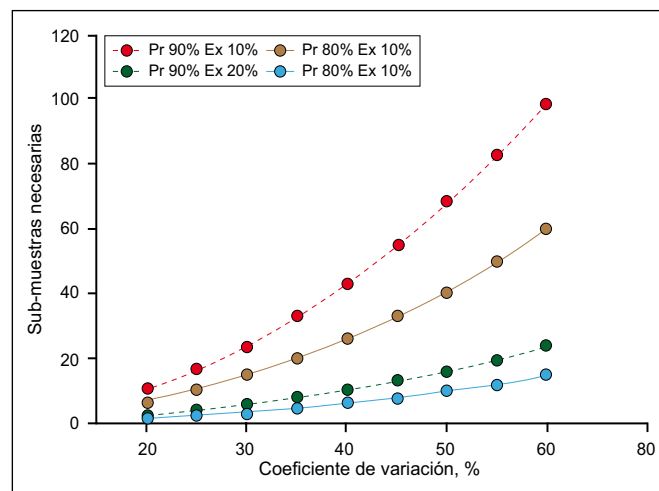


Figura 2. Cantidad de sub-muestras necesarias en función de la variabilidad de nutrientes dentro del área a representar, expresada como coeficiente de variación (%). Las curvas indican distintos niveles de precisión (Pr) y exactitud (Ex). Cálculos basados en Anghinoni et al. (2003).

mayor proporción de raíces de la mayoría de los cultivos de grano (Costa et al., 2010; Farmaha et al., 2012; Kirby, 2002).

Por su parte, nutrientes como el nitrógeno (N) de nitrato y, en menor grado, el azufre (S) de sulfato, que presentan mayor movilidad en el suelo, pueden alcanzar capas más profundas y las raíces de los cultivos allí presentes pueden tomarlos. Por ello, en general, se recomienda conocer la disponibilidad de estos nutrientes en 0-60 cm. Ello puede lograrse muestreando tres capas de 20 cm cada una, dos de 30 cm o directamente una de 60 cm. En este sentido, es importante notar que el muestreo de distintas capas puede generar errores debido a posible mezcla de capas al desmoronarse el orificio de muestreo o arrastrar suelo con el barreno a medida que se avanza en profundidad. Por ello, será necesario retirar cualquier resto de suelo o residuo que pudiera caer en el orificio de muestreo de modo de evitar contaminar la muestra de la capa que sigue. Una alternativa es muestrear una capa superior y luego a partir de la concentración de nitrato o sulfato presente en esta capa estimar, con cierto grado de precisión, la concentración hasta capas más profundas (**Figura 3**). Al ajustar regresiones a los datos de la **Figura 3** surgen las siguientes ecuaciones que permitirían estimar el nivel de N-nitrato de 0-60 cm a partir de mediciones realizadas en capas superficiales:

$$\text{Ec. 1: N-nitrato (0-60 cm)} = \text{N-nitrato (0-20 cm)} * 2.04 \quad R^2 = 0.86$$

$$\text{Ec. 2: N-nitrato (0-60 cm)} = \text{N-nitrato (0-40 cm)} * 1.24 \quad R^2 = 0.98$$

Estas ecuaciones tienen validez para los suelos de la zona de donde provienen las muestras que originaron la información de la **Figura 3** (Noroeste de Buenos Aires, noreste de La Pampa y suroeste de Córdoba, Argentina). Es importante considerar los eventos de lluvias en las semanas previas a los muestreos, ya que precipitaciones abundantes en días previos pueden mover el nitrato o sulfato por debajo de los 20 cm por lo cual se puede subestimar la disponibilidad de N y/o S.

Para el caso de mediciones de disponibilidad de nutrientes con objetivos de recomendación de fertilización, la profundidad de muestreo deberá ser la que se utilizó para calibrar el modelo que se utilizará para realizar la recomendación. Es decir, por ejemplo, para el caso del P la gran mayoría de los modelos de respuesta utilizados en la región pampeana argentina están calibrados considerando muestreos de 0-20 cm mientras que para N-nitrato están calibrados para disponibilidades de 0-60 cm (a lo que se adiciona el N de fertilizante). Si bien estos modelos son los más utilizados existen otros modelos de recomendación (alternativos y complementarios), principalmente en lo relativo a fertilización nitrogenada (García, 2005).

Finalmente, un punto importante a remarcar es que la intensificación en la fertilización con P de las últimas décadas, sumado a la siembra directa (poco a nulo

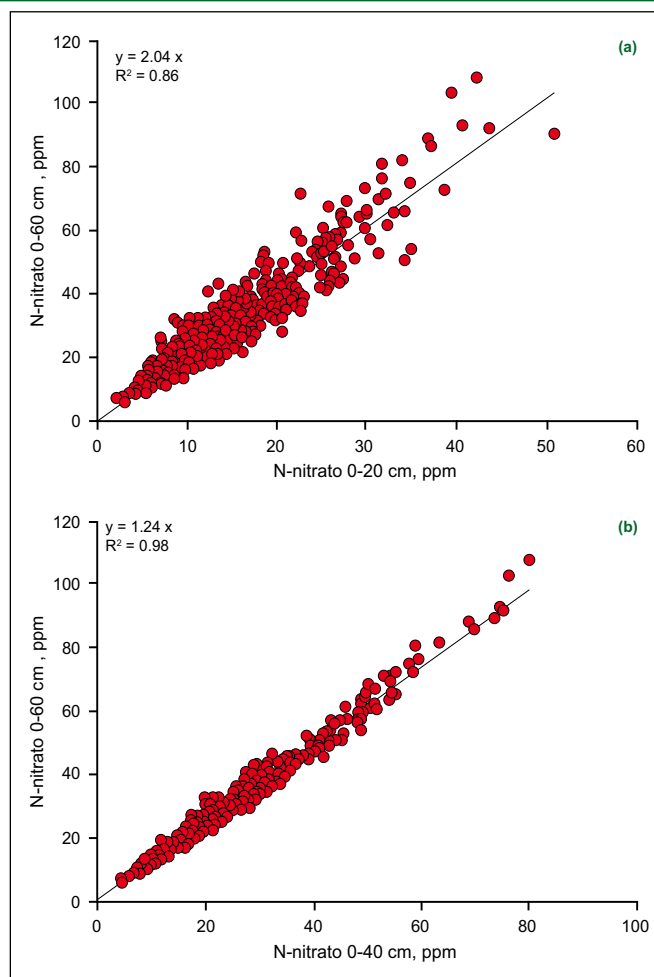


Figura 3. Relaciones entre contenido de N-nitrato en 0-60 cm y a) N-nitrato en 0-20 cm o; b) N-nitrato en 0-40 cm. Datos de análisis realizados en el laboratorio Marasas & Asociados provenientes de las campañas 2013-14 y 2014-15. Cantidad de pares de datos = 670. Muestras provenientes de Noroeste de Buenos Aires, Noreste de La Pampa y Suroeste de Córdoba, Argentina.

mezclado de suelo), ha generado una estratificación vertical de este nutriente (García y Picone, 2004; Bullock, 2005; Duiker y Beegle, 2006; Costa et al., 2010). Sin embargo, modelos de respuesta a fertilización que consideran muestreos de 0-20 cm de lotes en siembra directa, tienen similares niveles críticos de P (nivel por debajo del cual sería conveniente aplicar fertilizante) a aquellos encontrados antiguamente para labranza convencional, según lo demuestran distintos trabajos (García y Picone, 2004 y trabajos citados por éste). Por otro lado, esta estratificación vertical del P determina que se deba prestar especial cuidado a mantener constante la profundidad de muestreo. Muestrear solo unos cm menos que los recomendados (ejemplo 0-18 cm) genera riesgos de sobre-estimación de la concentración del nutriente, mientras que si se muestrea mayor profundidad (ejemplo 0-22 cm) ocurrirá lo contrario al incluir capas inferiores con menor concentración de P.

Época y frecuencia

La época y frecuencia de muestreo dependen de la movilidad y/o estabilidad en el tiempo del nutriente (o

parámetro a evaluar) (Roberts y Henry, 2001) y de la fuente de dónde provienen dado que determina la tasa con que se transforman en disponible para los cultivos. El N-nitrato y el S-sulfato son “móviles” y por esto son más propensos a lixiviarse con el agua de lluvia. Por otro lado, provienen principalmente de la mineralización de la MO con lo cual su disponibilidad varía de acuerdo con las condiciones ambientales que afectan tal mineralización (humedad y temperatura, principalmente). A su vez, el cultivo previo y su nivel de rendimiento pueden afectar marcadamente la concentración de nitrato y sulfato en el suelo a través de su tasa de consumo. Estas cuestiones hacen que los niveles de N-nitrato y S-sulfato cambien de manera marcada a lo largo del año y entre años. Por todo esto, se recomienda muestrear lo más próximo al momento de siembra. Por otra parte, si bien existen distintos modelos de recomendación de fertilización (García, 2005), la mayoría de los utilizados en la región pampeana (Rendimiento vs. N del suelo + N del fertilizante) se basan en mediciones de disponibilidad realizadas inmediatamente antes de la siembra. Por ello, de utilizar tales modelos, se estaría sub-estimando la disponibilidad de N si se muestrea mucho antes de la siembra, mientras que muestrear luego de la siembra sobre-estimaría tal disponibilidad.

Para nutrientes menos “móviles” y más “estables” como el P o parámetros más “estables” como la MO, la CIC, la textura y el pH, no es tan importante la época del año en que se muestrea. Sin embargo, aunque el P es más “estable” que el nitrato o el sulfato, existen trabajos que demuestran una cierta variabilidad estacional de este nutriente (Giuffrè et al., 1995; Vázquez, 1986). Por ello, es recomendable muestrear siempre durante el mismo momento cada vez que se lleve a cabo tal tarea, especialmente en el caso de realizar un seguimiento a través de las campañas. Por otra parte, para determinar P, MO, CIC y/o pH, dada su condición de relativa estabilidad en el tiempo (respecto de nitrato y sulfato), no es necesaria una frecuencia de muestreo anual excepto que se pretenda evaluar el impacto de, por ejemplo, la fertilización fosfatada en el balance de P. En general, una alternativa muy utilizada es muestrear para análisis de P solamente previo a la siembra de cada cultivo de gramínea en la rotación, dado que son los cultivos que más responden a la fertilización con este nutriente. Asimismo, la poca variación en el corto plazo facilita elegir con mayor tranquilidad el momento oportuno de muestreo. Esto permite evitar muestrear con condiciones de saturación hídrica de suelo o luego de una reciente fertilización y hacerlo con el tiempo adecuado para remitir las muestras al laboratorio y tener los resultados en tiempo y forma.

Por último, y no menos importante, considerar que de ocurrir un evento de lluvia es recomendable muestrear al menos 48 horas luego de ocurrido el mismo.

Extracción y acondicionamiento de la muestra

La extracción de cada sub-muestra debe realizarse preferentemente con barreno de acero inoxidable, limpio y sin herrumbres. Esta herramienta debe estar debidamente afilada de modo que permita producir una muestra uniforme a lo largo de la sección de corte, sin comprimir el suelo ni muestrear distintas cantidades de distintas profundidades. Existen distintos tipos de barrenos, siendo los más comunes (**Figura 4**):

- **Tubular media caña:** el más utilizado en la mayoría de los suelos de la región pampeana. Permite un mínimo de alteración de la muestra y un corte uniforme a lo largo de toda la profundidad muestreada. No es recomendable o es poco útil en suelos duros o con presencia de piedras o tosquilla.
- **Helicoidal o tipo holandés:** varía su configuración según el tipo de suelo a muestrear. Si bien permite menor esfuerzo en suelos duros o con presencia de piedras produce un mayor disturbio y mezclado de la muestra (muestreo menos uniforme).
- **Riverside:** recomendado para suelos duros y/o con presencia de piedras.

Si bien el barreno (distintos tipos) es la herramienta más frecuentemente utilizada en la región pampeana, algunos trabajos sugieren el uso de pala de corte, la cual permitiría tomar mayor cantidad de suelo por cada sub-muestra y disminuir la cantidad de sub-muestras a recolectar para cada muestra compuesta (Anghinoni et al., 2003). Para muestrear con pala de corte se deberá cavar y vaciar un pozo hasta la profundidad que se pretende muestrear (**Figura 5**) y para cada sub-muestra. Luego se deberá sacar una rebanada de aproximadamente 3 cm de espesor y de esta rebanada quedarse solo con el tercio del centro.

Debe prestarse especial atención y colocar cada sub-muestra en el recipiente (o bolsa) correspondiente a la muestra compuesta que se está generando. Este recipiente debe estar debidamente identificado con al menos la siguiente información: i) establecimiento, ii) lote, iii) ambiente (si existiera), iv) geo-referencia (si se tomó), v) profundidad muestreada, y vi) nutrientes o parámetros a analizar.



Figura 4. Tipos de barrenos para muestreo de suelo.

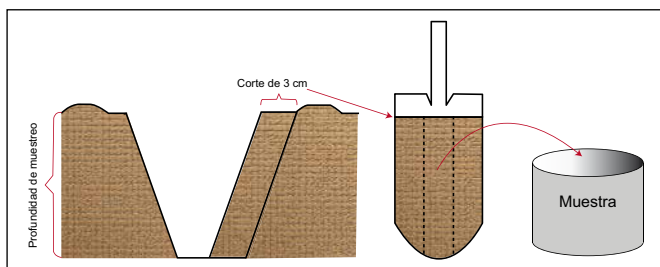


Figura 5. Esquema de forma de muestreo con pala de corte.

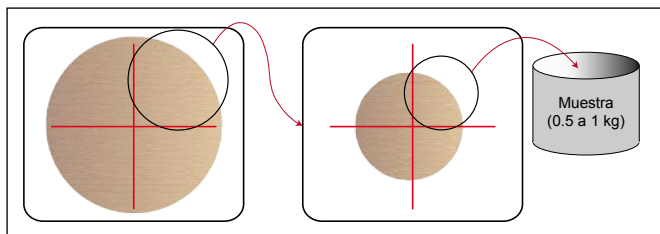


Figura 6. Esquema de método de cuarteo y reducción de muestra.

Una vez finalizada la recolección de cada muestra compuesta se recomienda reducirla hasta alcanzar 0.5 a 1 kg en caso de que supere tal cantidad. Para ello, y para mantener la representatividad, es *muy importante* primero desterronar y mezclar adecuadamente la totalidad de la muestra obtenida. Luego, proceder a reducir el tamaño de la muestra mediante cuarteos. Esto es, esparcir la muestra sobre una lona plástica limpia y dividirla en cuatro partes iguales. De estas partes se selecciona solo una y se repite el proceso de ser necesario. Este proceso de homogenización y reducción es crítico ya que determina fuertemente la representatividad de la muestra obtenida. Por ello, de no poder realizarlo a conciencia se recomienda enviar la muestra completa al laboratorio.

Una vez lograda cada muestra compuesta se deberá almacenar en bolsa plástica resistente (o doble bolsa) y limpia, debidamente rotulada con, al menos, la información citada anteriormente. Para la rotulación se deberá utilizar marcador resistente al agua y en caso de rotular en papel, no poner el papel en contacto con el suelo muestreado. Una vez listas las muestras deberán conservarse en lugar fresco (preferentemente en conservadora a menos de 20°C) y sin exposición al sol para enviar lo antes posible al laboratorio. De contener, el suelo muestreado, demasiada humedad o de demorarse el envío al laboratorio se recomienda arear el suelo al aire en lugar *fresco y no expuesto al sol*. Una vez secas volver a colocar cada muestra en su respectiva bolsa cerrada lo más herméticamente posible. Conservar en frío o desecar al aire evitará reacciones químicas o biológicas que ocurren en un suelo disturbado, las cuales afectarán los resultados del análisis. De todos modos, lo recomendable es enviar las muestras al laboratorio lo antes posible, lo cual minimizará la ocurrencia de cualquier cambio químico en la muestra obtenida.

Bibliografía

- Álvarez, R., H.S. Steinbach, B. Bauschen, y J.N. Enjalbert. 2008. ¿Cuántas submuestras de suelo hay que tomar para caracterizar la fertilidad de un lote en la Pampa Ondulada? *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 37:17-19.
- Anghinoni, I., J. Schindwein, y M. Nicolodi. 2003. Manejo del fósforo en siembra directa en el sur de Brasil: Variabilidad de fósforo y muestreo de suelo, *El fósforo en la agricultura argentina*, INPOFOS, Acassuso, Buenos Aires, Argentina. pp. 20-26.
- Bullock, D. 2005. Efecto del muestreo en la precisión exactitud del análisis de suelos bajo condiciones de siembra directa. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 56:3-5.
- Cline, M.G. 1944. Principles of soil sampling. *Soil Science* 58:275-288.
- Costa, S.E.V.G.A., E.D. Souza, I. Anghinoni, J.P.C. Flores, F.C.B. Vieira, A.P. Martins, y E.V.O. Ferreira. 2010. Patterns in phosphorus and corn root distribution and yield in long-term tillage systems with fertilizer application. *Soil and Tillage Research* 109:41-49. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2010.04.003>.
- Chang, J., D.E. Clay, C.G. Carlson, S.A. Clay, D.D. Malo, R. Berg, J. Kleinjan, y W. Wiebold. 2003. Different techniques to identify management zones impact nitrogen and phosphorus sampling variability. *Agronomy Journal* 95:1550-1559. DOI: 10.2134/agronj2003.1550.
- Díaz-Zorita M., Duarte G., Grosso G. 1998. Soil fertility distribution in livestock production systems with pastures directly grazed, 4th Conference on Precision Agriculture, Minnesota, USA.
- Duiker, S.W., y D.B. Beegle. 2006. Soil fertility distributions in long-term no-till, chisel/disk and moldboard plow/disk systems. *Soil and Tillage Research* 88:30-41. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2005.04.004>
- Farmaha, B.S., F.G. Fernández, y E.D. Nafziger. 2012. Distribution of soybean roots, soil water, phosphorus and potassium concentrations with broadcast and subsurface-band fertilization. *Soil Science Society of America Journal* 76:1079-1089. DOI: 10.2136/sssaj2011.0202.
- Franzen, D.W. 2008. Developing zone soil sampling maps, NDSU Extension Service.
- Franzen, D.W., y L.J. Cihacek. 1998. Soil sampling as a basis for fertilizer application, NDSU Extension Service.
- Franzen, D.W., T. Nanna, y W.A. Norvell. 2006. A survey of soil attributes in North Dakota by landscape position. *Agronomy Journal* 98:1015-1022. DOI: 10.2134/agronj2005.0283.
- García, F.O. 2005. Criterios para el manejo de la fertilización del cultivo de maíz. *INPOFOS/PPI/PPIC Cono Sur*.
- García, F.O., y L.I. Picone. 2004. Fósforo: Dinámica y manejo en sistemas de siembra directa. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 56:3-5.
- Giuffrè, L., O. Heredia, N. Arrigo, M. Conti, y J. Storti. 1995. Variación espacial y temporal del fósforo extractable en un ciclo de maíz sembrado bajo dos sistemas de labranza: convencional y directo. *Agronomía Costarricense* 19:57-60.
- Gutiérrez-Boem, F.H., y P.A. Marasas. 2005. Pequeñas zonas con altas concentraciones de fósforo causan grandes errores en la determinación de fósforo disponible a nivel de lote. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 25:9-11.

- Jobbágy, E., y R. Jackson. 2001. The distribution of soil nutrients with depth: Global patterns and the imprint of plants. *Biogeochemistry* 53:51-77. DOI: 10.1023/a:1010760720215.
- Jobbágy, E.G., y R.B. Jackson. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications* 10:423-436. DOI: 10.1890/1051-0761(2000)010[0423:tvdoso]2.0.co;2.
- Johnson, A., L.J. Swenson, y W.C. Dahnke. 1983. The soil testing program in North Dakota. *ND Farm Research* 41:24-26.
- Kirby, E.J.M. 2002. Botany of the wheat plant, in: B. C. Curtis, et al. (Eds.), *Bread wheat: Improvement and production*, FAO, Rome.
- Kitchen, N.R., D.G. Westfall, J.L. Havlin. 1990. Soil sampling under no-till banded phosphorus. *Soil Science Society of America Journal* 54:1661-1665. DOI: 10.2136/sssaj1990.03615995005400060026x.
- Mallarino, A.P. 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, Acaassuso, Buenos Aires, Argentina. pp. 8-12.
- Mallarino, A.P. 2013. Manejo de fósforo y potasio con técnicas de agricultura de precisión. IPNI LACS.
- Mallarino, A.P., D.B. Beegle, B.C. Joern. 2006. Soil sampling methods for phosphorus-spatial concerns, Southern Education Research Activities (SERA) 17, United States Department of Agriculture.
- Mallarino, A.P., y D.J. Witty. 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. DOI: 10.1023/B:PRAG.0000022358.24102.1b.
- Roberts, T.L., y J.L. Henry J.L. 2001. El muestreo de suelos: Los beneficios de un buen trabajo. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 42:4-12.
- Swenson, L.J., W.C. Dahnke, D.D. Patterson. 1984. Sampling for soil testing. NDSU, Dept. of Soil Sci., Res. Report No. 8.
- Tyler, D.D., y D.D. Howard. 1991. Soil sampling patterns for assessing no-tillage fertilization techniques. *J. Fert. Issues* 8:52-56.
- Vázquez, M. 1986. Evolución estacional del P extractable del suelo en agroecosistemas de la provincia de Buenos Aires. *Ciencia del Suelo* 4:7-14.
- West, C.P., A.P. Mallarino, W.F. Wedin, y D.B. Marx. 1989. Spatial variability of soil chemical properties in grazed pastures. *Soil Science Society of America Journal* 53:784-789. DOI: 10.2136/sssaj1989.03615995005300030026x.

TIPS PARA TENER A MANO ANTES Y DURANTE EL MUESTREO

1. Frecuencia de muestreo

- N-nitrato y S-sulfato: previo a cada cultivo que requiera aplicación de nitrógeno o azufre.
- MO, P, pH, CIC, bases y micronutrientes: no es necesaria una frecuencia de muestreo anual excepto que se pretenda evaluar el impacto de alguna media correctiva, por ejemplo, fertilización fosfatada o enclado.
- Sugerencia 1: para análisis de P muestrear solamente previo a la siembra de cada cultivo de gramínea en la rotación, dado que son los cultivos que más responden a la fertilización con este nutriente.
- Sugerencia 2: muestrear para análisis de P cada 3 a 5 años pero con mayor intensidad de muestras por lote (por ejemplo muestreo en Estaciones individuales estratificado o mejor aún en Grilla de puntos o celdas).

2. Momento de muestreo:

- N-nitrato y S-sulfato: próximo al momento de siembra.
- MO, P, pH, CIC, bases y micronutrientes: no es tan determinante el momento. Se recomienda hacerlo siempre alrededor de la misma época cada vez que se realice.
- De ocurrir un evento de lluvia es recomendable muestrear al menos 48 horas luego de ocurrido el mismo.

3. Metodología de muestreo (utilizar información de la Tabla 2).

Pautas que pueden orientarnos:

- ¿Cuánto estoy dispuesto a invertir en costo de muestreo y análisis?
Costo de *Al azar simple* = Estaciones juntas simple < Estaciones individuales simple = *Al azar estratificado* = Estaciones juntas estratificado < Estaciones individuales estratificado << Grilla.
- Dispongo de ambientación de mi lote o, no dispongo pero observo que el lote cuenta con distintos ambientes y voy a ambientarlo.
- Se recomienda muestreos *Estratificados* (azar o estaciones).
- Tengo posibilidad de realizar aplicación variable de nutrientes?
Se recomienda verificar si en el lote se diferencian ambientes y de ser así ambientar y realizar muestreo *Estratificado* (azar o estaciones).

- El lote cuenta con varios años de aplicación de fertilizantes en bandas (fósforo) y/u observo mucha variación de los resultados de análisis de P entre un año y otro.
Se recomienda muestrear en Estaciones y si es posible *Estaciones individuales* (una muestra por estación).
- Desconozco el lote por completo, tanto en historia de manejo como en ambientes.
Se recomienda *Estaciones individuales* y de observarse distintos ambientes *Estaciones individuales estratificado*.
- Quiero conocer en detalle la variabilidad espacial de nutrientes poco móviles de mi lote (fósforo, potasio).
Se recomienda *Grilla* de puntos o celdas.

4. Cantidad de sub-muestras a recolectar:

- Muestreos al azar: Nunca muestrear menos de 25 sub-muestras por cada muestra compuesta, aún en lotes pequeños.
- Muestreo por estaciones: Nunca muestrear menos de 8 sub-muestras por estación, en lo posible 12 o más.
- Muestreo en grilla de puntos o celdas: Nunca muestrear menos de 8 sub-muestras por punto o celda, en lo posible 12 o más.

5. Profundidades recomendadas:

- 0-20 cm: MO, P, pH, CIC, bases y micronutrientes.
- 0-60 cm: N-nitrato y S-sulfato (pueden estimarse los valores de 40-60 cm a partir de los resultados de 0-40 cm, ver Ecuación 2).

6. Recordar llevar al campo:

- GPS, de ser necesario.
- Barreno (debidamente afilado y sin herrumbes) o pala de corte.
- Recipientes contenedores en cantidad suficiente. Se recomienda contar con un balde plástico para cada profundidad de muestreo dentro de los cuales colocar las bolsas contenedoras de muestras debidamente etiquetadas.
- Bolsas etiquetadas en cantidad suficiente con la siguiente información: i) establecimiento, ii) lote, iii) ambiente (si existiera), iv) espacio para anotar geo-referencia (si se tomará), v) profundidad muestreada, vi) nutrientes o parámetros a analizar.
Se recomienda etiquetar previo a ir al campo. De utilizar dos bolsas para cada muestra es útil colocar la etiqueta de papel entre ambas bolsas (evitará que entre en contacto directo con el suelo y se deteriore o borre). Utilizar lápiz o marcador resistente al agua.
- Se recomienda llevar conservadora con refrigerante para mantener temperatura de muestras en un nivel adecuado.

7. Extracción de sub-muestras:

- Con barreno o pala de corte (ver **Figuras 4 y 5**).
- Remover restos de material vegetal de la superficie del suelo.
- NO remover materia orgánica integrada al suelo.
- Es muy importante respetar la profundidad de muestreo durante la toma.
- Prestar especial atención y colocar cada sub-muestra en el recipiente correspondiente.

8. Acondicionamiento:

- De ser necesario reducir la muestra mediante cuarteo hasta 0.5 a 1 kg.
- Si se reduce la muestra es muy importante y crítico desterronar y mezclar muy bien.
- Conservar las muestras en lugar fresco, no expuesto al sol y enviar cuanto antes al laboratorio.
- De contener demasiada humedad o de demorarse el envío al laboratorio se recomienda arear el suelo al aire en lugar *fresco* y *no expuesto al sol*.