

Dr. J. S. ...
 ...

...
 ...
 ...

METODOLOGÍA DE MUESTREO DE SUELO

Protocolo básico común: ESTRUCTURA DEL SUELO

CAZORLA, Cristian; DE BATTISTA, Juan José; FERRARI, Manuel; GUDELJ, Olga; QUIROGA, Alberto; SASAL, María Carolina; TABOADA, Miguel; WILSON, Marcelo.

1. Objetivo del muestreo

Al igual que en la mayoría de los muestreos, el objetivo general es obtener una muestra representativa del sitio con la mayor precisión y el menor costo económico posibles. Sin embargo, la heterogeneidad de los ambientes, las diferencias de manejo, los requerimientos específicos de los ensayos que se aplicarán a las muestras tomadas y la diversidad de los objetivos propios de las investigaciones que demandan el muestreo, determinan que no siempre es posible contar con una estrategia única y óptima. Por ello, ante esta complejidad, se establecen pautas generales, básicas, que luego se ampliarán en cada una de las metodologías consideradas.

2. Materiales necesarios

Para la tarea de campo se requiere de ciertos elementos esenciales, con los cuales se deberá contar en el momento del muestreo, entre ellos elementos para la extracción, identificación y traslado de las muestras al laboratorio. Sin embargo, dado que cada una de las metodologías requiere, además, de ciertos materiales específicos, se abordará este ítem en cada una de ellas.

3. Pautas para la toma de muestras

3.1. Plan de muestreo

Previo al muestreo deben preverse diversos aspectos relacionados al mismo, los que se plasmarán en un plan de muestreo. Dentro del plan se define el número de muestras a tomar, su posición y profundidad; se establecen

criterios para la toma de muestras, se incluye un listado de los elementos necesarios y se estima el tiempo que insumirá realizar el muestreo.

3.2. Caracterización del área de estudio

Antes de comenzar un muestreo de indicadores físicos, es recomendable recopilar cierta información mínima del área de estudio, a saber:

- *Climática*: precipitaciones (media, anual y mensual, distribución mensual de lluvias, últimas lluvias previas al muestreo, etc.), temperatura (promedios, máximas y mínimas mensuales, etc.).
- *Geomórfica*: relieve, pendiente dentro del lote y en los sitios de muestreo, etc.
- *Edáfica*: serie de suelo, textura, profundidad de horizontes, etc.
- *Georeferenciación* del lote y de las áreas de muestreo (longitud, latitud).
- *Historia agronómica*: uso de la tierra, descripción del manejo pasado y presente del suelo, sistemas de siembra, prácticas conservacionistas realizadas, rotación o secuencia de cultivos, frecuencia y tipo de operaciones de cultivo, fertilización, manejo de los residuos, rendimientos de los cultivos, duración de la pastura, tipo de pastoreo, años desde pastura o pastizal, años desde desmonte, donde correspondiera, información histórica de la propiedad a medir, etc.
- *Existencia de un sitio de referencia o testigo* (ver 3.6. Muestreo de un sitio de referencia o testigo).

3.3. Tipo de muestreo

Respecto al diseño del muestreo, en general, para medición de indicadores físicos se suele usar el *muestreo aleatorio simple*, ya que es el más apropiado para poblaciones relativamente pequeñas y homogéneas, es fácil de implementar y permite obtener una muestra representativa de la situación. Sin embargo, en sistemas agrícolas hay que tener en cuenta las posiciones de los surcos del

cultivo antecesor, como así también el patrón de tránsito (huellas que son posibles de identificar en el lote o parcela). De esta manera, es posible considerar el efecto de manejo acumulado en el tiempo, ya sea de labranza, pastura perenne o forestación (efecto planta/efecto bosque) y adecuar el muestreo en transectas transversales de modo de poder interpretar el alto coeficiente de variación que normalmente presentan las propiedades físicas. Idealmente, en muestreo de propiedades físicas deben discriminarse situaciones del lote que, presumiblemente, posean diferente estado físico (por ej. cabeceras y centros de lote, surcos y entre-surcos, huellas de rodados agrícolas, zonas próximas a aguadas y corrales de encierre, suelos diferentes en lotes con consociaciones, etc).

3.4. Momento de muestreo

El momento de muestreo es importante, dado que las propiedades del suelo varían con las estaciones del año y son afectadas tanto por los factores climáticos, tal como ocurre con la estabilidad estructural (Gudelj y Masiero, 2001), como por las operaciones de manejo, como la labranza. En general, un buen momento de muestreo es el otoño, después de la cosecha de los cultivos estivales.

Si se trata de un ensayo de larga duración, donde los muestreos se repiten con cierta periodicidad, es importante realizarlos en el mismo mes (o, al menos, en la misma estación del año) para minimizar los errores de interpretación que pudieran derivarse de las variaciones climáticas anuales.

Dado que la mayor parte de las propiedades físicas requieren la extracción de muestras no disturbadas, es esencial evitar la toma de muestras con bajo contenido hídrico, ya que se quiebran y resquebrajan. El estado ideal de agua edáfica es el de capacidad de campo, o ligeramente próximo a éste (Álvarez y Taboada, 2008).

3.5. Frecuencia de muestreo

3.5.1. Temporal

El monitoreo de variables físicas puede realizarse anualmente o cada dos años. Simultáneamente a la situación que se está evaluando (coincidiendo tanto en momento como en frecuencia), debe realizarse el muestreo de los sitios tomados como referencia.

3.5.2. Espacial

Es conocido que las características físicas de un lote son altamente variables y afectadas por numerosos factores, por ello, al encarar el muestreo dentro de un lote, se deben seleccionar sitios que sean representativos del mismo. Debe prestarse especial atención a las diferencias de contenidos hídricos en el suelo, diferencias en el crecimiento de cultivos, áreas con salinidad, mezcla de horizontes, etc.

Como se mencionó anteriormente, la precisión y la confianza del dato que se obtendrá en el laboratorio estarán relacionadas con la calidad del muestreo y, como en estas variables no se obtienen muestras compuestas, esa calidad se definirá en función de la cantidad de réplicas que aporten su información al dato final de la situación muestreada. Por supuesto, el número de puntos de muestreo dependerá de la variabilidad del terreno, del parámetro en estudio, del objetivo de la investigación y de las posibilidades, técnicas y humanas, con que se cuente.

3.6. Muestreo de un sitio de referencia o testigo

En concordancia con lo expresado en el capítulo de COS, es conveniente identificar la existencia de un área con posibles condiciones de referencia que pueda ser tomada como guía comparativa para analizar los resultados de las propiedades medidas y que se encuentre lo más cercana posible a las áreas de estudio.

Puede considerarse *condición de referencia* al suelo de un bosque nativo con mínima perturbación o a un sector no laboreado de relieve y serie de suelo semejante a la zona que se va a muestrear. Podría tomarse también al suelo debajo de un alambrado que durante muchos años permaneció inalterado, o un área parquizada durante muchos años o el suelo lindante a las vías del ferrocarril (aunque se trata de aspectos muy discutidos). También debe tomarse con

precaución el considerar a las pasturas como referencias, en especial cuando son pastoreadas por ganado doméstico, dado que éste es causante de compactación de suelos. Por ello, sólo pasturas no degradadas o con baja perturbación, pueden ser tomadas como referencia.

Es importante tener en cuenta que los montes forestales sólo son buena referencia para áreas desmontadas (por ej. NEA y NOA). Estos no resultan una referencia adecuada, en cambio, en zonas donde inicialmente el suelo se desarrolló bajo un pastizal o pastura, pues dentro de un monte forestal las condiciones del suelo, tanto las físicas como las químicas, cambian significativamente.

En ensayos de larga duración se considera condición de referencia a la situación inicial (estado de base).

EVALUACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO

Los aspectos físicos que se utilizan regularmente para la evaluación de la estructura del suelo y que se describen a continuación son: *densidad aparente, estabilidad de agregados, resistencia mecánica a la penetración y perfil cultural.*

1. DENSIDAD APARENTE DEL SUELO

Introducción

La densidad aparente (δ_{ap}) de un horizonte o capa de suelo es la relación que existe entre la masa de suelo seco a 105°C y el volumen que ocupa. Para su evaluación se debe tomar una muestra de suelo que mantenga su ordenamiento natural, ya que ésta considera el volumen ocupado por la parte sólida del suelo y también el espacio poroso, expresando los resultados en g.cm⁻³. La δ_{ap} del suelo varía, entre otros factores, con la textura, la estructura, el contenido de materia orgánica y las labranzas. Para suelos de Argentina oscila en un rango de 0,9 a 1,8 g cm⁻³.

La δ_{ap} tiene múltiples aplicaciones agronómicas, destacándose la evaluación de la densificación de los suelos, el cálculo del peso de la capa arable, el cálculo del contenido de carbono orgánico y de los distintos nutrientes (tn ha⁻¹), el cálculo de la porosidad y del agua disponible en el suelo. Existen diferentes métodos de determinación de la δ_{ap} (Lamas y Moreno, 2000), entre otros, el método del cilindro de volumen conocido, el método del doble cilindro de volumen conocido, el método de determinación del volumen con agua o arena, el método del agregado o de la parafina y los métodos que usan radiaciones electromagnéticas.

En esta sección se describe sólo el *método del cilindro de volumen conocido.*

Método del cilindro

Basado en Stengel (1983). Analyse de la Porosité: Seminaire CEE-Agrimed, 14-18 Mars, INRA.

Como su nombre lo indica, este método utiliza un cilindro de acero de volumen conocido, con uno de sus bordes biselado, para permitir la penetración en el suelo.

1.1. Material necesario

- Cilindro de acero inoxidable con tapas y con el borde inferior ligeramente biselado, con un volumen generalmente comprendido entre 100 y 400 cm³.
- Muestreador con borde biselado y mango de metal. Su uso facilita la penetración del cilindro en el suelo y permite extraer la muestra de suelo en forma pareja.
- Cuchillo.
- Pala de punta.
- Bolsas limpias y etiquetas para la conservación e identificación de la muestra.
- Cinta métrica.
- Estufa que alcance 105°C de temperatura.
- Desecador.
- Balanza analítica con una apreciación mínima de 0.01 g.

Nota: En la elección del volumen del cilindro debe tenerse presente la condición y características del suelo, y el uso que se hará de la muestra.

1.2. Condiciones de muestreo

Al igual que en la mayoría de las situaciones de obtención de muestra, se debe poner especial atención a la condición hídrica que presenta el suelo en el momento del muestreo. En este sentido, no es conveniente realizar el muestreo con el suelo demasiado seco ni demasiado húmedo. En el primer caso, puede producirse fracturación de la muestra y en el segundo, compactación de la misma (ambas distorsionarán el resultado del ensayo). Dado que la condición óptima para el muestreo es con el suelo próximo a capacidad de campo, si el mismo está muy seco, puede humectarse 24 hs. antes del muestreo o, por el contrario, si está demasiado húmedo, puede esperarse uno o dos días para que éste pierda humedad.

1.3. Procedimiento de muestreo

- Remover la cobertura vegetal, si se muestrea desde la superficie, o realizar una calicata para extraer las muestras de los horizontes o profundidades deseadas.
- Introducir el muestreador con el cilindro. El muestreador debe insertarse en el suelo con presión constante, lentamente y sin girarlo de modo de reducir al máximo el efecto de compactación lateral sobre la muestra. Evitar la percusión con martillo u otra herramienta similar porque su uso puede alterar la muestra (compactación, fracturación). Extraer el cilindro con pala, cuchillo u otro instrumento, asegurando que la muestra de suelo sobresalga de la parte inferior del cilindro.
- Adecuar las dos caras de la muestra a la dimensión del cilindro (enrasar), emparejando cuidadosamente con el cuchillo; cortar las raíces con mucho cuidado para no perder suelo (para ello se puede valer de una tijera, pero se deberá repetir la toma de la muestra si se han incorporado raíces muy grandes).
- Limpiar la superficie externa del cilindro y colocarle las tapas o introducir el mismo en una bolsa de nylon.
- Identificar la muestra mediante etiquetas.
- Llevar al laboratorio.

1.4. Acondicionamiento de la muestra en el laboratorio y ensayo

- Ubicar los cilindros en bandejas y poner en estufa a 105°C durante, al menos, 24 hs., o hasta peso constante.
- Llevar a desecador hasta que llegue a temperatura ambiente.
- Pesar el conjunto (muestra + cilindro- M_1) y luego el cilindro limpio (M_2).

Nota: Dado que el contenido hídrico del suelo es uno de los parámetros esenciales que es necesario conocer para la evaluación de las distintas propiedades del suelo, es posible emplear la misma muestra sobre la que se cuantificará la δ_{ap} para determinarlo. Para ello, es esencial conservar el cilindro en una bolsa plástica hasta su análisis. Una vez en el laboratorio, se debe pesar el cilindro con el suelo húmedo, previo a su secado a 105°C, para

poder calcular, por diferencia, luego del mismo, el contenido de humedad de la muestra (la diferencia de masa entre suelo húmedo y suelo seco corresponderá al agua que se ha evaporado durante el secado en la estufa). (Ver Protocolo básico Común: AGUA DEL SUELO. Humedad Gravimétrica)

1.5. Cálculo y Resultado

El valor de la densidad aparente (δ_{ap}) es igual a:

$$\delta_{ap} = \frac{M_{ss}}{V_s} [g \cdot cm^{-3}]$$

Dónde:

M_{ss} = masa del suelo seco.

V_s = volumen del suelo (equivalente al volumen del cilindro empleado para el muestreo).

En la práctica:

$$\delta_{ap} (g \cdot cm^{-3}) = \frac{M1(g) - M2(g)}{V (cm^3)}$$

Dónde:

$M1$ = masa total (masa de la muestra seca más el cilindro)

$M2$ = masa del cilindro limpio

V = Volumen del cilindro

1.6. Limitantes del método

- Si la estructura es poliédrica subangular, angular o prismática con prismas grandes, no es posible utilizar el método del cilindro, ya que los cilindros deberían tener dimensiones muy grandes. En estos casos se utiliza el *método de la excavación*.
- En suelos arcillosos (sobre todo aquellos que presentan arcillas expandibles) y secos, además de la posibilidad de fracturación, pueden

encontrarse poros muy grandes o macrofisuras que inducen a error en los resultados, por ello es indispensable muestrear con un contenido hídrico óptimo (cercano a capacidad de campo).

- Se deben considerar las características del cilindro. Debe tenerse en cuenta que, en general, a medida que se reduce el volumen del cilindro, aumenta la dispersión de los resultados. También debe considerarse que es recomendable emplear cilindros con relación diámetro / altura de 1,25 a 2, y espesor de pared del cilindro entre 4 mm y 1 mm (cuando el volumen disminuye desde 1000 cm³ a 50 cm³). En este sentido, si se reduce la relación diámetro/altura del cilindro, se incrementan los riesgos de compactación. En cambio, si esta relación aumenta (por ejemplo, porque se disminuye mucho la altura), aumenta el error relativo por los defectos de enrase (no se aconseja una relación diámetro / altura menor a 1 o mayor a 2.5).
- Es importante determinar el contenido hídrico al momento del muestreo (sobre la misma muestra).
- Aunque el muestreo puede ser realizado por una sola persona, el tiempo necesario para la extracción de las muestras dependerá de la profundidad a la que se trabaje y de las características del suelo.

1.7. Precisión

Dado que los efectos de compactación o de fisuración no son cuantificables y la calidad del enrase también es difícil de evaluar, se debe tomar un número de muestras adecuado para lograr un coeficiente de variación aceptable, esto es menor al 6% (Gudelj y Masiero, 1996).

Gudelj y Masiero (1996) afirman que para suelos Argiudoles típicos (textura franco-limosa), con 6 muestras tomadas al azar se pueden lograr niveles de confianza aceptables. Para otros suelos, el número de muestras a tomar puede variar, pero en general, se aconseja un mínimo de 5 muestras por situación a evaluar.

1.8. Análisis de resultados

Siempre es importante analizar los resultados de densidad aparente, en conjunto con los datos de humedad edáfica de cada cilindro, dado que algunos suelos poseen potencial de expansión-contracción volumétrica con los cambios de humedad. Esto es típico en Vertisoles, pero también sucede en otros suelos que poseen arcillas expandibles. Por ello, lo recomendable es expresar la densidad a una humedad constante (por ejemplo, a capacidad de campo).

2. ESTABILIDAD DE AGREGADOS

Introducción

Una buena estructura del suelo, que presente un adecuado volumen y distribución de poros, garantiza la entrada de agua y aire, su circulación, almacenamiento y redistribución entre los horizontes y, además, el óptimo aprovechamiento de los nutrientes. Sin embargo, el uso y manejo agrícola provoca modificaciones en la estructura natural del suelo que, a largo plazo, pueden condicionar su productividad. La estabilidad de agregados es una estimación de la capacidad del suelo para mantener la arquitectura de la fracción sólida y del espacio poroso cuando ésta es sometida a fuerzas originadas por la acción del agua o a esfuerzos mecánicos externos (Kay, 1990). Es un indicador que ha resultado de gran sensibilidad para mostrar cambios ante diferentes manejos y usos del suelo (Lal, 1994). En Argentina, se han utilizado diferentes métodos de laboratorio para evaluar la estabilidad de agregados de los suelos. Los resultados que se obtienen con los distintos métodos no son equivalentes y, si bien están relacionados entre sí, en general tienden a dar mayor importancia a alguno de los mecanismos individuales de desagregación. En esta sección se describen las metodologías de muestreo para los *métodos de De Boodt y De Leenheer* (1967) y de *Le Bissonnais et al.* (2002).

2.1. Metodología de De Boodt-De Leenheer

Basado en:

- ❖ De Boodt, M. y L. De Leenheer. 1967. *West European Methods for Soil Structure Determination, VII. The State Faculty Agricultural Sciences. Gent. Bélgica. Pp 60-62.*
- ❖ Santanatoglia, O.J. y Fernández, N.. 1982. *Modificación del método. De Boodt y De Leenheer para el análisis de la distribución de agregados y efecto del tipo de*

embalaje y acondicionamiento de la muestra, sobre la estabilidad estructural. Revista de Inv. Agrop. INTA. Bs.As. Rep.Arg. Vol XVII, N°1. Pp 23-31. ISSN 0325 – 8718.

Este método evalúa la estabilidad frente al impacto de las gotas de lluvia y el movimiento del agua, fenómenos que están asociados con el proceso de erosión. Una buena estructura para el crecimiento de los cultivos depende de la presencia de agregados de 1 a 10 mm de diámetro estables en agua (Tisdall y Oades, 1982). El método que se describe integra agregados comprendidos entre 2 y 8 mm de diámetro.

2.1.1. Material necesario

- Cuchillo.
- Pala de punta.
- Bolsa de plastillera, bolsas plásticas limpias, bandeja para la conservación de la muestra.
- Etiquetas para identificación de la muestra.
- Cinta métrica.
- Guantes.

2.1.2. Condiciones de Muestreo

- La muestra se debe tomar con el suelo próximo a capacidad de campo; si el suelo está seco seguramente se alterará el resultado. Se recomienda muestrear 2 ó 3 días después de una lluvia.
- Si se muestrea en superficie, cuidar que la extracción no se realice en una zona donde se aprecie a simple vista, la marca de una huella dejada por el tránsito.
- La profundidad de muestreo (altura del prisma) se debe mantener constante en cada sitio de muestreo para que los datos obtenidos sean comparables.
- Si el lote o parcela que se muestrea presenta alguna irregularidad (por ej. manchones, depresiones, etc.), tomar muestras de esos sectores por separado.
- Tomar muestras de referencia en sitios naturales no sometidos a labranzas ni pisoteo durante muchos años (por ej. debajo de los alambrados o en el suelo con muchos años bajo parque, en el establecimiento).

2.1.3. Procedimiento de Muestreo

- Remover la cobertura vegetal, si se muestrea desde la superficie, o realizar una calicata para extraer las muestras de los horizontes o profundidades deseadas.
- Extraer con pala una muestra, de aproximadamente 1 kg, evitando, en lo posible, que se disturbe.
- Descartar la porción de muestra en contacto con la pala.
- Cortar con un cuchillo una porción prismática según la profundidad (0-5, 5-10 ó 0-10 cm, etc.) que se quiera medir, dependiendo del sistema de labranza, criterio del investigador y objetivo de trabajo.
- Colocar la muestra en una bolsa o en una bandeja de plástico y guardar con su correspondiente identificación a la sombra o cubrir.
- Trasladar las muestras al laboratorio.

2.1.4. Acondicionamiento de la muestra en el laboratorio

- Desagregar la muestra a mano, con mucho cuidado, hasta obtener agregados de entre 4 y 8 mm de diámetro. Debe evitarse en todo momento comprimir los agregados.
- Secar al aire, en una atmósfera templada y ventilada. Durante este período, los agregados más grandes pueden ser desterronados con la mano periódicamente, para producir, en las condiciones de humedad óptimas, el máximo de agregados de tamaño milimétrico.

2.1.5. Cálculo y Resultado

El índice de estabilidad obtenido por este método está dado por la diferencia que existe entre el diámetro-peso medio de los agregados secados al aire y el mismo luego de ser humedecidos, incubados y tamizados bajo agua, es decir, después de ser sometidos a fuerzas desagregantes semejantes a las que afectan los agregados en condiciones naturales. Este índice se expresa como CDMP (cambio en el diámetro medio ponderado) y la unidad de medición es milímetro (mm). Para evaluar el grado de degradación o de restauración de la estructura del suelo a través del dato de CDMP, se expresa el mismo como *índice*

de estabilidad relativo (IER) respecto de CDMP de un suelo de referencia (suelo virgen); de esta forma se pueden comparar valores de distintos suelos y manejos.

$$\text{IER (\%)} = \frac{\text{CDMP suelo de referencia}}{\text{CDMP suelo estudiado}} * 100$$

Este método es aplicable a muestras de suelo con agregados sin disturbar, tanto para suelos francos como arcillosos.

2.1.6. Limitantes del método

- La estabilidad de agregados presenta variaciones estacionales definidas por cambios ambientales. Por consiguiente, si el objetivo es realizar un seguimiento anual, será necesario que las muestras siempre sean extraídas en la misma época del año. Por ejemplo, si se comenzó a realizar en otoño, todos los muestreos deberán realizarse en la misma época, y siempre con el contenido hídrico del suelo próximo a la capacidad de campo.
- El tiempo necesario para la extracción de las muestras dependerá de la cantidad de tratamientos a evaluar. Para muestrear un tratamiento, con tres repeticiones, y considerando que se toman tres sub-muestras por repetición (en total nueve puntos de muestreo por tratamiento o situación a evaluar), se puede estimar un tiempo de 20-30 minutos.

2.1.7. Precisión

La precisión en el resultado de la medición se verá afectada por el contenido hídrico del suelo al momento del muestreo, los cuidados en el manejo de la muestra, y el número de muestras extraídas por situación a evaluar. Lo ideal es tomar al azar, entre 8 y 10 muestras por situación a estudiar y nunca menos de 3, a efectos de lograr niveles de confianza aceptables.

2.1.8. Análisis de resultados

El análisis de los resultados de estabilidad de agregados debe hacerse en función del objetivo de la investigación, que puede ser, por ejemplo, caracterizar un determinado tratamiento o hacer un seguimiento de la evolución del parámetro para ese sitio o tratamiento, pero siempre deberán hacerse en función

de las condiciones en que se realizó el muestreo (época del año, situación de la rotación o el manejo que se está evaluando, condiciones de humedad del suelo, etc.).

2.2. Metodología de Le Bissonnais

Basado en :

- ❖ *Le Bissonnais, .Y; Duval, O. y H. Gaillard. 2002. Fiche de protocole : Mesure de la stabilité d'agrégats de sols. INRA Orléans, Unité de Science du Sol.*

Como se expresó, existen distintos mecanismos de desagregación en el suelo, entre ellos, desagregación por compresión del aire ocluido, lo que origina la ruptura de los agregados por estallido ante el humedecimiento de los mismos; desagregación mecánica debida al impacto de las gotas de lluvia; microfisuración por hinchamiento diferencial y dispersión por procesos físico-químicos (Amézketa, 1999). En general, la medición de la estabilidad de agregados en el laboratorio, intenta reproducir alguno de estos mecanismos (Le Bissonnais, 1996). Para ello, este método propone tres pretratamientos de evaluación: humectación rápida por inmersión en el agua, desagregación mecánica por agitación con re-humectación en etanol y humectación lenta por capilaridad.

2.2.1. Material necesario

- Pala de punta.
- Cuchillo.
- Cinta métrica.
- Bolsas de plastillera, bolsa plástica, bandeja para conservación de la muestra.
- Guantes.
- Etiquetas para identificación de la muestra.

2.2.2. Condiciones de muestreo

Ídem 2.1.2

2.2.3. Procedimiento de muestreo

Ídem 2.1.3

2.2.4. Acondicionamiento de la muestra en el laboratorio

- Desagregar la muestra a mano, evitando comprimir los agregados.
- Secar al aire, en una atmósfera templada y ventilada. Durante este período, los agregados más grandes pueden ser desterronados con la mano periódicamente, para producir, en las condiciones de humedad óptimas, el máximo de agregados de tamaño milimétrico.
- Pasar la muestra por tamiz de 5 y de 3 mm y seleccionar los agregados retenidos en el tamiz de 3 mm para los diferentes pretratamientos. Colocar los agregados en estufa, a 40°C durante 24 hs para eliminar eventuales variaciones de humedad y uniformar las condiciones de tratamiento.

Pre-tratamientos utilizados para la determinación de estabilidad de agregados

Los pre-tratamientos son: humectación rápida por inmersión en agua o efecto “estallido” (DMPe), humectación lenta con agua por capilaridad (DMPc) y disgregación mecánica por agitación (DMPd).

El humedecimiento rápido (DMPe) aplica un estrés simulando la ocurrencia de una lluvia en condiciones de suelo seco, donde ocurre un estallido de los agregados por un brusco desplazamiento del aire, conocido como “slacking”. El humedecimiento lento (DMPc), o por capilaridad, evita el “slacking” simulando la ocurrencia de una lluvia en condiciones de suelo húmedo. Por último, la disgregación mecánica por agitación (DMPd) después de la re-humectación en etanol evalúa la cohesión mecánica en húmedo de los agregados.

Tratamiento 1: Humedecimiento rápido

Este pretratamiento es el más rápido y sencillo de aplicar y es apropiado para la mayoría de los suelos. El procedimiento es el siguiente:

1. Colocar 5 g de agregados secos entre 3 y 5 mm de diámetro en un recipiente de 250 cm³ que contiene 50 cm³ de agua destilada, dejar durante 10 min;
2. Retirar el agua con una pipeta;
3. Transferir el material, utilizando una piseta con alcohol, a un tamiz de 53 µm de malla, previamente inmerso en alcohol;
4. Realizar 5 movimientos oscilantes del tamiz inmerso en alcohol, y luego transferir los agregados mediante piseta con alcohol a un recipiente. Retirar el exceso de alcohol con una pipeta y llevar el recipiente a estufa a 40 °C durante 48 horas.

Tratamiento 2: Humedecimiento lento

Este pretratamiento es menos destructivo que el anterior y puede permitir una mejor discriminación entre suelos inestables. El procedimiento es el siguiente:

1. Colocar 5 g de agregados secos entre 3 y 5 mm de diámetro sobre un filtro de papel, en una tabla de tensión a un potencial mátrico de -0.3 kPa durante 30 minutos (algunos suelos arcillosos requieren más tiempo para alcanzar la saturación).

Nota: una alternativa es colocar los agregados sobre papel de filtro colocado sobre espuma sintética de 5 cm de espesor mojada, con una diferencia de tensión de agua de 3 cm durante aproximadamente 2 horas.

2. Transferir el material a un tamiz de 53 µm de malla previamente inmerso en alcohol;
3. Realizar 5 movimientos oscilantes del tamiz inmerso en alcohol, y luego transferir los agregados mediante piseta con alcohol a un recipiente. Retirar el exceso de alcohol con una pipeta y llevar el recipiente a estufa a 40 °C durante 48 horas.

Tratamiento 3: ruptura mecánica por agitación después de humedecimiento lento

El objetivo del humedecimiento lento antes de la ruptura mecánica es evaluar la cohesión mecánica de los agregados en húmedo, independientemente del slacking. Para ello, el aire debe ser removido antes de aplicar el test con alcohol, el cual es un líquido no polar que es efectivo para esto. El procedimiento es el siguiente:

1. Colocar 5 g de agregados secos entre 3 y 5 mm de diámetro en un recipiente de 250 cm³ que contienen 50 cm³ of de alcohol durante 10 min;
2. Retirar el alcohol con una pipeta;
3. Transferir el material a un Erlenmeyer de 250 cm³ lleno con 50 cm³ de agua destilada y ajustar el contenido de agua dentro del Erlenmeyer a 200 cm³;
4. Tapar el Erlenmeyer y agitar de un lado a otro, 20 veces;
5. Dejar en reposo durante 30 minutos.
6. Transferir el material a un tamiz de 53 µm de malla previamente inmerso en alcohol;
7. Realizar 5 movimientos oscilantes del tamiz inmerso en alcohol, y luego transferir los agregados mediante piseta con alcohol. Retirar el exceso de alcohol con una pipeta y llevar el recipiente a estufa a 40 °C durante 48 horas.
8. Colocar los agregados secos sobre una columna de tamices de 2000, 1000, 500, 250, 100 y 53 micrones de malla y tamizar con 20 movimientos oscilantes a cada lado hasta formar un ángulo de 45 grados.

2.2.5. Cálculo y Resultado

El procedimiento descrito permite lograr la distribución de agregados para los tamaños >2000 µm, 2000-1000 µm, 1000-500 µm, 500-200 µm, 200-100 µm y 100-50 µm. El DMP de cada pretratamiento se obtiene realizando la suma algebraica de las masas relativas (% en peso) de las fracciones remanentes sobre

cada tamiz, multiplicadas por la apertura media de dos tamices adyacentes, como lo indica la siguiente fórmula:

$$DMP = \sum [\text{Diámetros medios entre dos tamices (mm)} * (\% \text{ de partículas retenidas sobre el tamiz})] / 100$$

A su vez, con el promedio de los tres pre-tratamientos para cada muestra de campo, se determina un índice que sintetiza la información obtenida con los tres pre-tratamientos evaluados (DMPm).

2.2.6. Limitantes del método

- El método puede aplicarse a una gran variedad de suelos, esencialmente a los horizontes superficiales. Sin embargo, la presencia de elementos gruesos (toscas y gravas) en la fracción de 2-5 mm puede interferir en los resultados. Si la proporción de elementos gruesos está comprendida entre el 10 y el 40%, será necesario tomar en cuenta aquellos > a 2 mm resultantes de los pretratamientos y calcular un DMP teniendo en cuenta los elementos gruesos y un DMP sin ellos. Si la proporción es mayor a 40%, las pruebas de estabilidad de agregados no tienen significado.
- El tiempo necesario para la extracción de las muestras dependerá de la cantidad de tratamientos a evaluar. Para muestrear un tratamiento, con tres repeticiones, y considerando que se toman tres sub-muestras por repetición (en total nueve puntos de muestreo por tratamiento o situación a evaluar), se puede estimar un tiempo de 20-30 minutos.

2.2.7. Precisión

Idem 2.1.7.

2.2.8. Análisis de Resultados

Ídem 2.1.8

3. RESISTENCIA MECÁNICA A LA PENETRACIÓN

Introducción

La aplicación continua de fuertes presiones (por paso de maquinaria agrícola, pisoteo de animales, etc.) provocan la degradación de la estructura del suelo y, por consiguiente, su compactación con consecuencias negativas en la producción. Por ello, entre los estudios realizados para evaluar la estructura del suelo se incluye la resistencia mecánica a la penetración (RMP) como un indicador que permite caracterizar los efectos físicos adversos que presenta el suelo al crecimiento de las raíces. Este estudio se realiza directamente en el campo (en el laboratorio generalmente se mide la RPM de costras de suelo) y, por ello, muchas veces no es necesario extraer una muestra.

La RMP está definida como la fuerza necesaria aplicada por unidad de superficie, para introducir una punta cónica hasta una cierta profundidad del suelo (Micucci y López Menardi, 2004). Esta depende de la textura, la densidad, la materia orgánica y el contenido hídrico del suelo (Campbell y O'Sullivan, 1991; Jorajuría Collazo, 2004) y puede ser evaluada a través de penetrometría, para lo cual pueden utilizarse diferentes tipos de penetrómetros o penetrógrafos.

Los instrumentos más sencillos de medición de RMP son aquellos que utilizan una barra delgada y en la punta un cuerpo cónico, ideados para reproducir la morfología del extremo de las raíces. Los penetrómetros indican el esfuerzo para ser introducidos en el suelo mediante distintos dispositivos, desde el sencillo penetrómetro de impacto reproduciendo la fuerza de una pesa que cae de una altura constante, hasta sistemas más sofisticados que aseguran una velocidad de penetración constante (Cerana *et al.*, 2004).

Dado que las características de los instrumentos de medición definen la RPM que se cuantifica, el tamaño de las puntas y la velocidad con que se introducen en el suelo han sido normalizadas por la ASAE (1992). El diámetro de la varilla, la rugosidad del cono y la velocidad de penetración inciden incrementando la RMP. El ángulo del cono y el diámetro de la base, en cambio, inciden inversamente. Así, la RMP disminuye si el ángulo del cono está comprendido entre 7.5° y 30° y, a partir de allí, se incrementa hasta 60° (Jorajuría Collazo, 2004).

3.1. Metodología del Penetrómetro Digital

Basado en el uso del Penetrómetro Eijkelkamp penetrologger 2000
(<http://www.eijkelkamp.com/en/products/soil/in-situ-soil-physical-research/penetrologger>).

Estos penetrómetros (como es el caso del *Eijkelkamp penetrologger 2000*) presentan control de profundidad, velocidad y registro continuo de la fuerza y resolución de 1 cm, permitiendo obtener perfiles de RMP hasta los 80 cm de profundidad. Poseen un sensor de carga y un transductor, e incorporan un procesador con pantalla LCD y un software para acumular y visualizar promedios y rangos de variación. La conexión a una PC permite organizar el plan de trabajo e imprimir los informes, además de volcar los datos a una planilla de cálculo.

Para la determinación se introduce el penetrómetro hasta la profundidad deseada a través del empuje dado por el propio peso del operario, manteniendo una velocidad constante, que es controlada por un sensor de velocidad.

3.1.1. Material necesario

- Penetrómetro electrónico Eijkelkamp penetrologger 2000 con sensor de fuerza, registrador y data logger, que permite almacenar datos y sus accesorios. Hay otros diseños similares en el mercado, de otras marcas.
- Varilla de sondeo de 1 m.
- Conos de 30° y 60° de semiángulo, con superficie de base entre 1, 2 y 3,3 cm².
- Placa metálica de referencia de profundidad (sistema de regulación de profundidad a través de un sistema ultrasónico), la cual presenta en el centro un agujero por donde pasa la varilla de sondeo.
- Software para descargar los datos a una PC, con interfase gráfica.

3.1.2. Condiciones de muestreo

Al igual que la mayoría de las determinaciones físicas del suelo, la RMP es una determinación muy dependiente del contenido hídrico, por lo que se recomienda realizar las mediciones con suelos próximos a la capacidad de campo, lo que garantizará la homogeneidad respecto a este factor, y acompañar los datos de RMP con determinaciones de contenido hídrico del suelo. Cuando se desea

comparar distintos tratamientos de manejo o secuencias de cultivo, el otoño o principios de invierno, a la salida de los cultivos estivales, suele ser una época particularmente apropiada para efectuar estas mediciones, ya que en ese momento los lotes se encuentran libres de cultivos vivos y, por lo tanto, en condiciones más homogéneas de humedad de suelo, además de próximos a capacidad de campo, lo cual es favorecido por las lluvias otoñales.

Sin embargo, puede también existir un interés en detectar restricciones para el crecimiento radical en cultivos estivales y relacionarlas con alteraciones morfológicas en raíces, en cuyo caso las evaluaciones deberían realizarse con contenidos de humedad de suelo inferiores.

En resumen, el momento de muestreo puede cambiar y estará sujeto a los objetivos del estudio.

3.1.3. Procedimiento

- Programar el proyecto de medición (número de mediciones, por parcelas y repeticiones, tipo de cono –ángulo y superficie- y velocidad de penetración).
- Seleccionar el cono de medición según las características texturales y de humedad del suelo. Colocar el cono seleccionado en la varilla de sondeo, y luego ubicar la varilla de sondeo debajo del sensor de fuerza.
- Remover la cobertura vegetal y colocar la placa metálica de referencia de profundidad.
- Seleccionar el proyecto programado y dar la orden de comienzo en el registrador.
- Realizar la medición pasando la varilla de sondeo a una velocidad constante por la placa metálica de regulación de profundidad.
- Guardar la medición.
- Una vez completado el proyecto, descargar la información a la PC a través del software, pudiendo visualizar los resultados en la interfase gráfica.
- Procesar los datos en planilla de cálculo.

3.1.4. Resultado

Los datos de RMP son registrados centímetro por centímetro hasta la profundidad de 80 cm y expresados en megapascales (MPa).

Los resultados pueden ser presentados según diferentes capas de suelo u horizontes.

Con la finalidad de caracterizar estados estructurales e identificar la localización de capas endurecidas en el perfil del suelo, las determinaciones pueden ser realizadas en transectas, de manera de construir isóneas de RMP.

3.1.5. Limitantes del método

- Los resultados dependen del contenido hídrico del suelo, por ello, es importante relacionar, mediante regresión, los datos de RMP con los de humedad edáfica. Si esto fuera factible permitiría corregir los valores por humedad, usando la pendiente de la función ajustada. Otra opción válida es analizar a qué contenido de humedad edáfica se alcanzan valores críticos de RMP (2 MPa, según varios autores). Esto se ejemplifica en la siguiente Figura 1.

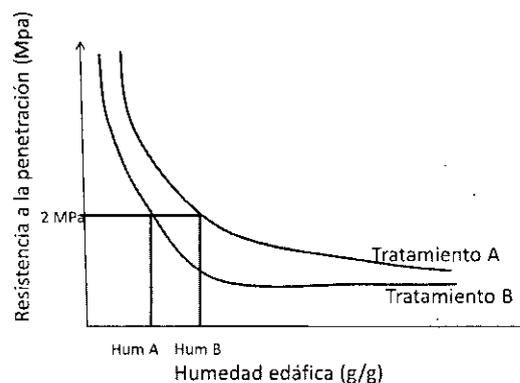


Figura 1. Resistencia a la penetración en función del contenido hídrico para dos tratamientos diferentes.

- En condiciones húmedas, los suelos arcillosos pueden adherirse a la varilla de sondeo provocando valores erróneos de RMP. En dichos casos se

recomienda lubricar la varilla de sondeo con algún lubricante, tal como la vaselina (Cerana *et al.*, 2004).

- El tiempo de medición estará de acuerdo a los objetivos planteados y dependerá de la profundidad de recolección de información y del número de puntos a muestrear. Las determinaciones pueden ser realizadas por una sola persona.

3.1.6. Precisión

Dado que el valor de RMP es dependiente del contenido hídrico, se recomienda trabajar con ecuaciones de regresión entre la RMP y el contenido de humedad de suelo (Wilson *et al.*, 2006), siempre y cuando el ajuste de la relación obtenido sea aceptable. En general, los suelos más secos y con altas RMP aumentan la variabilidad de los registros obtenidos.

Por otro lado, se ha observado una mayor variabilidad de los datos de RMP ante la presencia de huellas y pisos de labor, y en áreas decapitadas y zonas de rellenos.

3.1.7. Análisis de Resultados

El valor crítico de RMP que impide la elongación radical de los cultivos es muy discutido, variando entre 0,9 y 3 MPa (Eavis *et al.*, 1969; Glinski y Lipiec, 1990) aunque, en general, el valor más aceptado es 2 MPa, dependiendo del penetrómetro utilizado (Greacen, 1986; da Silva y Kay, 1996). En general, frente a estos valores se cotejan los resultados obtenidos.

3.2. Metodología del Penetrómetro de Impacto

Basado en el uso del penetrómetro de impacto de punta cónica

El penetrómetro de impacto tiene bajo costo y su diseño satisface normas nacionales e internacionales.

3.2.1. Material necesario

Su mecanismo de operación consiste en la acción del impacto de una masa (pesa) que cae libremente, guiada por una varilla, desde una altura

preestablecida sobre el tope de una sonda con una punta cónica en su extremo. Permite cuantificar la RMP que ofrece el suelo por centímetros de profundización de la punta, con muy poca disturbación del suelo. Para comenzar a medir, la superficie base del cono debe estar alineada con la superficie del suelo.

Características del penetrómetro de golpe:

- ❖ Masa de la pesa = 2 kg
- ❖ Cono de acero inoxidable. Se distinguen dos tipos de conos recomendables (Norma IRAM 8063):

- ❖ *Cono para suelos duros*

- Ángulo del cono = 30°

- Superficie de la base = 130 mm^2

- Diámetro de la base del cono = $12,83 \text{ mm}^2$

- Diámetro del vástago = $9,53 \text{ mm}$

- ❖ *Cono para suelos blandos*

- Ángulo del cono = 30°

- Superficie de la base = 323 mm^2

- Diámetro de la base del cono = $20,27 \text{ mm}^2$

- Diámetro del vástago $15,88 \text{ mm}$

3.2.2. Condiciones de muestreo

Idem 3.1.4.

3.2.3. Procedimiento

- Colocar el penetrómetro en posición vertical.
- Ajustar la aguja del penetrómetro en el cero de la escala cuando el cono hace contacto con la superficie del suelo (lectura inicial = 0 cm).

- Llevar la pesa al tope superior.
- Soltar libremente la pesa para que recorra la distancia preestablecida hasta el tope inferior.
- Anotar la lectura de profundización de la sonda.
- *Nota: Es posible que el vástago se halle marcado a distancias regulares adecuadas a los objetivos de estos estudios (por ejemplo cada 5 cm). En tal caso, es posible contar y registrar el número de golpes necesarios para que el vástago se entierre en el suelo hasta llegar a la profundidad marcada y luego traducir estos golpes a unidades de energía, en función de la energía liberada por cada uno de ellos.*
- Repetir este procedimiento hasta que el cono penetre hasta 25-30 cm (esto dependerá de las características del penetrómetro, en algunos, profundidades mayores pueden provocar deformación del vástago).
- Realizar los cálculos.

3.2.4. Cálculo y Resultado

Fuerza que ejerce el suelo x Profundidad de penetración = Masa de la pesa x Distancia de caída

Fuerza que ejerce el suelo = $\frac{\text{Masa de la pesa} \times \text{Distancia de caída}}{\text{Profundidad de penetración}}$

Del concepto de presión (fuerza / superficie) surge que:

$$\text{RMP} = \frac{\text{Fuerza que ejerce el suelo}}{\text{Superficie}}$$

$$\text{RMP} = n^{\circ} \text{ golpes} \times \frac{\text{masa} \times \text{distancia de caída}}{\text{área cono} \times \text{profundidad (lectura)}}$$

Los resultados pueden ser presentados según diferentes capas de suelo u horizontes. La unidad de expresión de RMP es kilogramo fuerza por cada centímetro cuadrado de profundización (kgf/cm²), siendo 1 MPa = 10,2 kgf/cm².

3.2.5. Limitantes del método

- Es una medición muy variable a campo, con lo cual se hace necesario realizar varias determinaciones por tratamiento para lograr valores medios confiables que permitan detectar diferencias significativas entre ellos.
- Requiere mucho esfuerzo físico a campo y la medición, en general, se limita hasta los 25-30 cm de profundidad (ya que, como se dijo, mediciones a profundidades mayores tienden a deformar el vástago).
- Es una determinación dependiente del contenido hídrico del suelo. Para controlar esta variable es necesario hacer las mediciones de RMP cuando el suelo se encuentra próximo a capacidad de campo.
- La utilización del método insume tiempo en transcribir las lecturas realizadas a campo a una planilla de cálculo para poder finalmente obtener el resultado.
- El tiempo de medición se dará en función de los objetivos planteados y dependerá de la profundidad de muestreo y del número de tratamientos a evaluar. En suelos de textura franco limosa, próximos a capacidad de campo y con operadores entrenados en el manejo del penetrómetro, pueden insumirse unos 30 minutos para evaluar un tratamiento (por ej.: 20 puntos de medición tomados al azar hasta los 25-30 cm de profundidad).
- Se requieren dos operarios para realizar la medición.

3.2.6. Precisión

Ídem 3.1.6.

Es una determinación que presenta alta variabilidad, dependiendo de las situaciones de manejo y las condiciones hídricas de los lotes.

3.2.7. Análisis de Resultados

Ídem 3.1.7.

4. PERFIL CULTURAL

Basado en Gautronneau, Y. y H. Manichon. 1987. Guide Méthodique du Profil Cultural. Disponible en la página web del INRA y traducida en varios idiomas (http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/doc34-02/010011137.pdf) y Boizard H, Peigné J, Sasal MC, Guimarães MF, Piron D, Tomis V, Vian JF, Cadoux S, Ralisch R, Tavares Filho J, Heddadj D, De Battista JJ, Duparque A, Franchini JC, Roger-Estrade J. 2017. Developments in the “PROFIL CULTURAL” Method for an improved assessment of soil structure under no-till. Soil Tillage Res. 173, 92-103.

Introducción

El perfil cultural es un ensayo de campo que permite la descripción morfológica semi-cuantitativa de la estructura de suelos cultivados, basado en el reconocimiento que la variabilidad espacial del estado estructural del suelo no es aleatoria, sino que está condicionada por las operaciones de labranza y el sentido del tránsito de la maquinaria. La técnica permite diferenciar visualmente distintas estructuras en el perfil de suelo, clasificarlas por las características macroscópicas que le imprimen los sistemas de cultivo y mapearlas (Manichon, 1987), sin el disturbio que genera un muestreo o un tamizado, y con cierta independencia de la humedad del suelo al momento de la medición (Boizard *et al.*, 2002). Esta metodología de descripción morfológica de un corte del horizonte superficial está basada en la observación de la porosidad visible de terrones y el arreglo espacial entre ellos.

4.1. Material necesario

- Palas ancha y de punta
- Cinta métrica
- Cuchillo de hoja ancha
- Hilo, clavos o pinches para señalización
- Nivel de burbuja
- Regla de longitud suficiente para abarcar el ancho del corte de suelo practicado

- Estacas
- Insuflador manual

4.2. Procedimiento

Algunas consideraciones a tener en cuenta bajo *siembra directa*:

- Localizar una zona homogénea y representativa del tipo de suelo, historia de manejo, tránsito y estado de la vegetación a analizar.
- Extraer la tierra de una trinchera o calicata de al menos 1 m de ancho y 0,4 m de profundidad, excavada en forma perpendicular a la dirección de siembra o de la última labor realizada (la cara de observación debe estar protegida del pisoteo de los observadores).
- Delimitar la profundidad de los horizontes genéticos y la ubicación de las huellas.
- Observar el perfil y detectar los distintos tipos de estructuras con ayuda del cuchillo
- Diferenciar e identificar con ayuda de hilos o pinches los diferentes estados estructurales. En general, bajo siembra directa y en el primer nivel de organización estructural (estado interno de terrones de 1-2 cm de diámetro), suelen encontrarse los siguientes estados (Figura 2):
 - ❖ *Delta (Δ)*: terrones caracterizados por la ausencia de porosidad visible, con elevada cohesión y con caras de ruptura lisas (Manichon, 1987; Guerif *et al.*, 1994).
 - ❖ *Gamma (Γ)*: los terrones presentan una elevada porosidad visible (estructural), caras de ruptura rugosas y baja cohesión.
 - ❖ *Phi (Φ)*: Es similar al estado Δ , pero con fisuras en todas las direcciones originadas por acciones de contracción-dilatación de las arcillas, por congelamiento o desarrollo de raíces.
 - ❖ *Laminar (P)*: estructura con agregados delgados, fisuras y poros preferencialmente orientados en forma horizontal.
- Tomar fotografías a una distancia de 0,6 m y cada 0,35 m en dirección lateral.
- Ensamblar las fotografías para obtener la imagen del perfil completo.

- Realizar un esquema de los diferentes estados a escala para poder cuantificar su abundancia.
- Analizar con software para análisis de imágenes, el área cubierta por diferentes tipos de estructura (por ej.: software ImageJ de Rasband W., National Institute of Health, Bethesda, Maryland, USA)
- Tomar muestras en cada tipo de estructura para realizar el análisis del sistema de porosidad (densidad aparente y distribución de poros por origen).

ACLARACION: si bien todos estos pasos agilizan el procesamiento de la información, los mismos son opcionales. También pueden obtenerse las cartas estructurales y cuantificar en ellas la abundancia relativa de los distintos estados en forma manual, con ayuda de un papel milimetrado o cuadrículado. Otro tema a considerar es la disposición de los terrones en el perfil examinado (segundo nivel de organización).

Nota: La distribución de poros por su origen es un análisis físico cuantitativo de la estructura que discrimina la fase sólida del suelo de la fase de vacíos, complementaria, que constituye la porosidad del suelo (Stengel, 1979). El espacio poroso se divide en: (i) volumen poroso textural: resultante de la distribución espacial de las partículas elementales dependiente de la constitución mineral (arcilla, limo, arena) y orgánica del suelo y su ensamblaje, así como del tenor de agua, y (ii) volumen poroso estructural: presente entre los agregados estructurales y directamente ligado a acciones antrópicas, climáticas y biológicas.

La distribución de poros por su origen se basa en la clásica determinación a campo de densidad aparente con el método del cilindro, que se complementa con la técnica de densidad aparente textural en kerosén (Stengel, 1988). La densidad aparente textural considera el volumen ocupado por la parte sólida y el espacio de poros texturales. Se determina a partir de la densidad aparente de agregados de 2-3 mm de diámetro a la humedad de campo, estimada usando impregnación en kerosén y el método de peso hidrostático basado en el principio de Arquímedes' (Monnier et al., 1973; Stengel, 1979).

- La observación puede complementarse con otras mediciones *in situ*, como resistencia del suelo al corte. Para ello, se utiliza un equipo manual cuya paleta se entierra en la pared vertical del perfil de cada tipo de estructura (con repeticiones) y se realiza una torsión suave. El valor de torque (Newton-metro) aumenta para alcanzar su valor máximo justo antes de la ruptura del

suelo, luego desciende. El valor de torque máximo es registrado y permite comparar diferentes tipos de estructuras.

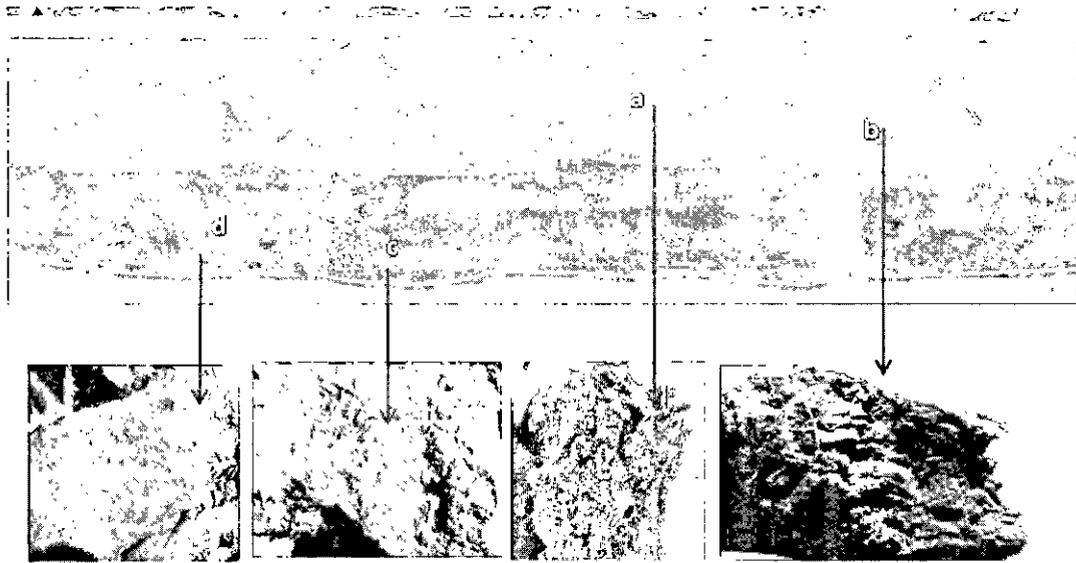


Figura 2. Perfil cultural representativo de un suelo bajo siembra directa mostrando en detalle los distintos tipos de estructura y su ubicación: (a) estructura Gamma (Γ) -alta porosidad-; (b) estructura Laminar (P) -poros preferencialmente dispuestos en forma horizontal-; (c) estructura Phi (Φ) -masiva con fisuras- y (d) Delta (Δ) -zonas con porosidad no visible y alta cohesión- (Sasal et al., 2017).

4.3. Resultado

La proporción de diferentes tipos de estructuras de suelo observadas en el perfil, se calcula relacionando el área medida y el área total del/los horizonte/s bajo estudio.

También se establece a campo el espesor de estructuras presentes en capas continuas en el corte longitudinal del perfil del suelo.

4.4. Limitantes del Método

Se trata de un método laborioso y destructivo, que no puede aplicarse para comparar situaciones o tratamientos de ensayos que cuentan con escasa superficie.

La realización de cada perfil cultural y su análisis, demanda aproximadamente dos horas, aunque esto depende del tipo de suelo y el entrenamiento del observador.

4.5. Precisión

La precisión depende del entrenamiento del observador, del número de perfiles evaluados por tratamiento o situación, y de la correcta localización de los sitios de evaluación.

4.6. Análisis de Resultados

Como se dijo, la observación del perfil permite distinguir visualmente distintas estructuras sin el disturbio que genera un muestreo, por lo tanto esta metodología permitirá cotejar el efecto de diferentes tratamientos, situaciones o manejos, sobre la estructura del suelo.