

LA ESTRUCTURA EN SUELOS DE TIERRA FINA

ORELLANA, Jorge de ¹

RESUMEN

Se presenta una revisión actualizada del concepto de estructura edáfica, pasando revista a los elementos bióticos y abióticos que la componen, describiendo los mecanismos naturales de agregación y sus procesos degradantes. Luego se propone el control idóneo de la calidad estructural midiendo variables estratégicas (algunas tradicionales y otras originales) cuyas técnicas se sugieren y describen someramente. Finalmente se considera la factibilidad de regenerar la estructura.

Palabras clave: estructura, agregación, degradación y regeneración de la estructura.

SUMMARY

Edaphic structure in fine earth soils.

This paper is an updated revision of the soil structure concept. The biotic and abiotic components of soil structure are described as well as the aggregates generation by natural process and their mechanisms of degradation. Next a suitable control of the structure quality by measuring strategic traditional and new variables is proposed, and the technique is shortly explained. Finally, the viability of the structure regeneration is discussed.

Key words: Soil structure, aggregation, degradation and regeneration of soil structure.

1.- Profesor Honorario de la Universidad Nacional del Litoral. Email: jade_ore@arnet.com.ar
Manuscrito recibido el 15 de mayo de 2009 y aceptado para su publicación el 5 de octubre de 2009.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVOS

La estructura edáfica es un tema continuamente tratado en innumerables publicaciones, desde trabajos de investigación en revistas altamente especializadas a capítulos enteros en libros de distinto nivel. Tan profusa presencia habla de su permanente actualidad, de su importancia para la vida y de la necesidad de avanzar aún más en el diagnóstico y tratamiento de sus problemas, que varían de una región a otra y con el uso dado al suelo.

Con el tiempo se fue ampliando el concepto agronómico de suelo: desde simple sostén mecánico y proveedor de nutrimentos a la vegetación hasta la configuración de un subsistema ecológico integrado por un medio abiótico, estructurado, con fases sólida, líquida y gaseosa, y una biota particular, todo en equilibrio dinámico. La calidad de la estructura edáfica está ligada al manejo sostenible de cada agroecosistema. Luego, para acceder a sistemas de AGRICULTURA SOSTENIBLE conviene que la estructura del suelo sea adecuada y perdurable (Orellana *et al.*, 1997, Orellana & Pilatti, 1999).

Con tal orientación se reúne aquí información útil para comprender el funcionamiento de los suelos y manejarlos criteriosamente. A la foránea se suma la de suelos pampeanos, en especial la derivada de trabajos desarrollados en la FCA (UNL). Esto permitirá constatar en el terreno los fenómenos descritos, repetir o continuar algunas de las experiencias citadas o adaptarlas a situaciones parecidas.

1.2. DEL USO AL ABUSO

El uso agrícola intensivo de las tierras pampeanas causó el deterioro de gran parte de sus suelos, insinuado por la merma de rendimientos y constatada por productores y técnicos.

Numerosas investigaciones señalaron entre los principales responsables de la degradación edáfica al excesivo laboreo, dando lugar a la adopción de labranzas conservacionistas. Pilatti *et al.* (1988), además de constatar los efectos degradantes de las labranzas tradicionales, demostraron que esa degradación afecta simultáneamente al estado físico, al equilibrio químico y a la biota del suelo.

Tras años ensayando distintas labranzas conservacionistas, se impuso la Siembra Directa, cuya adopción se generalizó con soja como principal cultivo. El auge de la soja alentó la deforestación y la sustitución de ganadería por agricultura, lo cual ahora recibe nuevo impulso con el fomento de la producción de biocombustibles. Al desmejorar el estado físico de los suelos, éstos pierden su rol de amortiguador de la irregularidad pluvial (Orellana, 1988a), favorecen anegamientos e inundaciones y se acentúan las sequías.

Urge prevenir, controlar y revertir el deterioro de los suelos. Para ello es preciso conocer detalladamente los procesos que rigen la formación, estabilidad y degradación de la estructura edáfica, a fin de elaborar tecnología ad-hoc. Este texto presenta información estratégica para tal finalidad.

2. ¿QUÉ ES ESTRUCTURA DEL SUELO?

2.1. CONCEPTO Y DEFINICIÓN DE ESTRUCTURA EDÁFICA

Puede asombrar que a esta altura de los tiempos salgamos a redefinir la estructura del suelo. Sin embargo, no es casual que ello ocurra, cuando otros autores también lo hacen -Lal (1991), González Carcedo (2007)- insatisfechos con definiciones clásicas de la estructura, como: "Los mismos fragmentos o terrones en que el suelo se desintegra" (Zha-

karov, 1927, según Baver *et al.*, 1973); "Agregación de partículas primarias separadas de agregados adyacentes por superficies débiles" (USDA, Soil Survey Staff, 1951) o "La manera en que están asociadas las partículas primarias" (Hénin *et al.*, 1958). Aunque todas expresan hechos reales, ninguna es funcional al uso agronómico del suelo.

Muchos consideran a la estructura del suelo como una propiedad. Otros, como un estado, una forma de presentarse, equiparando el concepto a los estados del agua: sólido, líquido y gaseoso.

Se puede definir a la estructura como la configuración física del suelo. En tal caso, homologando el perfil del suelo a un edificio, con tantos pisos como horizontes tiene el suelo, el conjunto de columnas, losas, cimientos y afines constituye su estructura; y cada losa, cada columna, es un elemento de

ella (Fig. 1) Por analogía, cada horizonte edáfico tendrá una estructura cuyos elementos serán sus unidades estructurales (*UEs*): prismas, columnas, bloques, etc.

El resto - la fase fluida - ocupada por líquidos (solución del suelo) y gases (atmósfera edáfica) es la "trama porosa" del suelo, hábitat de la biota edáfica, esencial para el crecimiento y desarrollo radical de las plantas superiores y vía de penetración, circulación y retención de agua y aire. Como la configuración de la fase sólida determina la de la trama porosa, gran parte del interés en estudiar la primera obedece a que ella condiciona a la segunda.

Volviendo a la analogía anterior: al diseñar un edificio decidimos dónde irán los muros, su espesor y qué aberturas tendrán; elegimos los materiales con los cuales serán hechos; los colores, dimensiones y ubica-

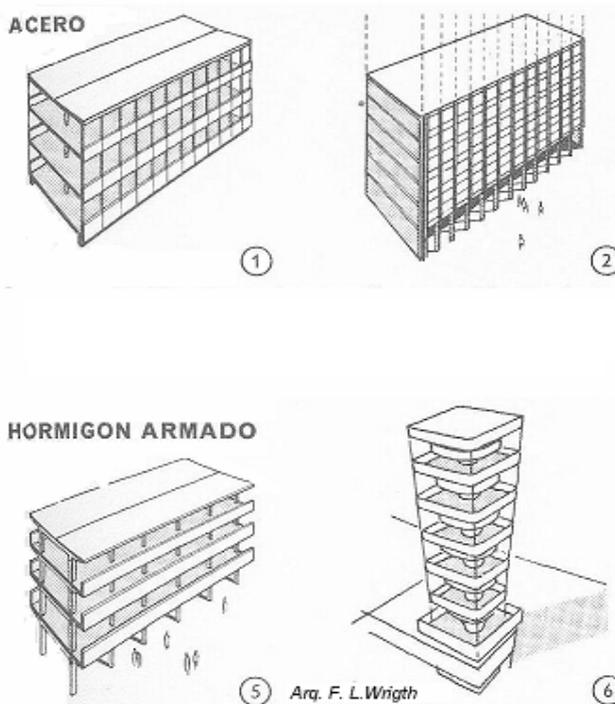


Fig. 1: Estructuras de edificios (Neufert, 1979).

ción de puertas, ventanas, pisos, paredes y techos. Pero nadie vivirá en las paredes, en las ventanas ni en el techo, sino en los espacios que ellos delimitan. El confort y la salubridad de la vivienda dependerán de la aislación térmica de sus muros y de la luminosidad y ventilación que las aberturas permitan. Luego, interesa la fase sólida del suelo, aunque raíces y otros organismos habiten en huecos, grietas y conductos de la trama porosa, cuya aptitud como hábitat depende de su configuración, condicionada por la de la fase sólida. La agricultura es un fenómeno biológico, y la aptitud agrícola de un suelo se vincula con la calidad de su trama porosa. Por eso Hamblin (1985) homologa la estructura edáfica a la trama porosa.

Como la definición clásica de la estructura se reduce a la forma y tamaño de las *UEs*, obviando la trama porosa consecuente, Lal (1991) la redefinió haciendo énfasis en la trama porosa: "Estructura es el tamaño, la forma, distribución espacial y continuidad de poros y huecos, su capacidad para retener y transferir fluidos y sustancias orgánicas e inorgánicas y su aptitud para permitir un vigoroso desarrollo y crecimiento de las raíces".

Podemos analizar esa definición dividiéndola en dos partes. La primera es descriptiva (obsérvese que "tamaño, forma, distribución espacial de poros y huecos" explicita la configuración de la trama porosa) y la segunda (el resto) es funcional. En cierto modo, eso coincide con Kay & Angers (2000) cuya definición de estructura adoptamos: **"estructura es la configuración de las fases sólida y fluida existentes en un suelo en un momento dado"**.

2.2. LOS COMPONENTES DE LA ESTRUCTURA

El suelo puede ser considerado como un subsistema dentro del ecosistema al cual pertenece. Desde ese punto de vista está integrado por un hábitat (el medio físico) y

su biota. Eso hace la diferencia entre un suelo y una roca sin vida. "La tierra es el hábitat de gran cantidad y variedad de organismos vivientes y sostén de su diversidad genética. El sostén de la biodiversidad es una función ecológica esencial de las tierras. A su vez, la actividad biológica sobre tierras y suelos contribuye a sus propiedades y características, que son esenciales para su función productiva" (FAO, 2007).

2.2.1. La biota. Pese a la importancia que la actividad biológica tiene en el suelo, su papel recién cobró interés mundial entre 1940 y 1950. Luego aparecieron importantes obras de base, como las de Murphy (1962), Bachellier (1963; 1978) y Phillipson (1971), esta última sobre metodología para acceder a los diferentes grupos biológicos del suelo. Por comodidad para su estudio se los agrupa por el tamaño de sus individuos (Bachelier, 1963, 1978; Odum, 1971). Ejemplos::

Microbiota (< 0,2 mm): algas, bacterias, hongos, protozoos y nemátodos;

Mesobiota (0,2 a 4 mm): nemátodos, pequeños oligoquetos (enquitreidos), pequeñas larvas de insectos y microartrópodos (en especial ácaros y colémbolos);

Macrobiota (4 a 80 mm): raíces de plantas, grandes oligoquetos (lombrices) e insectos.

Megabiota (> 80 mm): raíces, animales excavadores, etc.

La mayoría de esos seres participa -directa o indirectamente- en la elaboración de la estructura, sobre todo en horizontes superficiales, donde su actividad es más intensa. Preferente atención tienen, por su influencia directa, raíces y lombrices. Son escasos, en nuestro país, los estudios que vinculan a la biota con el manejo del suelo en el que se la describe. Pilatti *et al.* (1988), publicaron un estudio integral (físico, químico y biótico) de la degradación edáfica por manejo inadecuado.

2.2.2. El hábitat. El hábitat es, en principio, la fase fluida, condicionada por la configuración de la fase sólida, de cuya estabilidad depende. Para comprender y describir los procesos que originan, sostienen y destruyen a las *UEs*, se verá qué elementos -or-gánicos y minerales- las constituyen.

La parte orgánica se compone de secreciones y excreciones de la biota, restos vegetales y animales (pelos radicales, hojarasca, semillas, etc.) frescos o en proceso de biodegradación, cuyo punto final es el humus, de propiedades coloidales.

La fracción mineral está integrada por partículas de diverso tamaño. Las mayores (limo y arena) de actividad físico-química casi nula; las menores (minerales de arcilla, oxihidróxidos de hierro y aluminio) con propiedades coloidales. También puede haber sales poco solubles -carbonato y sulfato de calcio (yeso)- y otras más solubles: cloruros, nitratos, otros sulfatos, etc.

Las partículas pueden ser elementales -de un solo material (Fig. 2)- o compuestas (2 ó más partículas unidas) y su tamaño y cohesión interna regulan la dinámica y retención de fluidos. Interesa en especial la

tierra fina (partículas de 0 a 2 mm) cuyos componentes minerales se clasifican por tamaño en arcilla, limo y arena, según la escala utilizada (Fig. 3).

La Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo adoptó la escala propuesta en 1912 por Atterberg (Baver *et al.*, 1973); como ambas escalas sólo coinciden en el tamaño de la fracción arcilla, muchos las combinan: a la del USDA, le dividen el limo en fino (2-20 μm) y grueso (20-50 μm). Las propiedades de las arenas fina y muy fina se parecen a las del limo, hecho a tener en cuenta al evaluar el comportamiento físico del suelo.

Las combinaciones porcentuales de arcilla, limo y arena forman 12 clases de textura -expresas en un gráfico triangular (Fig. 3)- reconocibles "al tacto". La distribución por tamaño de esas partículas se determina por análisis granulométrico elemental, tras eliminar materiales ligantes -materia orgánica, oxihidróxidos, sales poco solubles (carbonato y sulfato de calcio) y solubles (cloruros, carbonatos y otros sulfatos), y dispersar los coloides. Luego, las partículas decantan por orden de tamaño.

La fracción arcilla, por sus propiedades

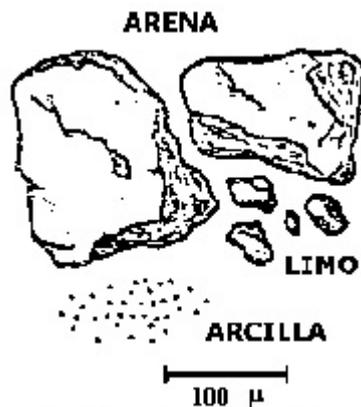


Fig. 2: Tamaño relativo de arena, limo y arcilla (muy aumentado) (Buckman & Brady, 1966)

coloidales, es la más importante para generar estructura, pero no se debe confundir su denominación con los minerales de arcilla, compuestos cristalinos, aunque la mayor parte de estos se halla dentro de tal fracción. A igualdad de proporciones arcilla-limo-arena, dominan las propiedades de la arcilla, dada su gran superficie específica y las cargas eléctricas de sus cristales, variables según el tipo de arcilla.

Los horizontes con altos porcentajes de arcilla se hinchan al humectarse y se tornan poco permeables. Al secarse se agrietan y generan vías preferenciales de infiltración. Pueden contener más agua que los de textura gruesa, pero la retienen con mayor inten-

sidad. Adsorben iones en forma intercambiable, afianzando la fertilidad química. La expansión radical suele verse dificultada.

Los suelos arenosos son muy permeables pero retienen poca agua. No captan bases intercambiables y son pobres en nutrimentos. En cambio, las raíces los exploran con facilidad

Los horizontes limosos reúnen defectos de los anteriores y pocas de sus virtudes. Se compactan con facilidad naturalmente, por pisoteo o por paso de vehículos. En superficie y desnudos tienden a formar *costras* (¶3.5, ¶5.4, ¶5.5.2) que afectan la emergencia de plántulas y el ingreso de aire y agua al perfil.

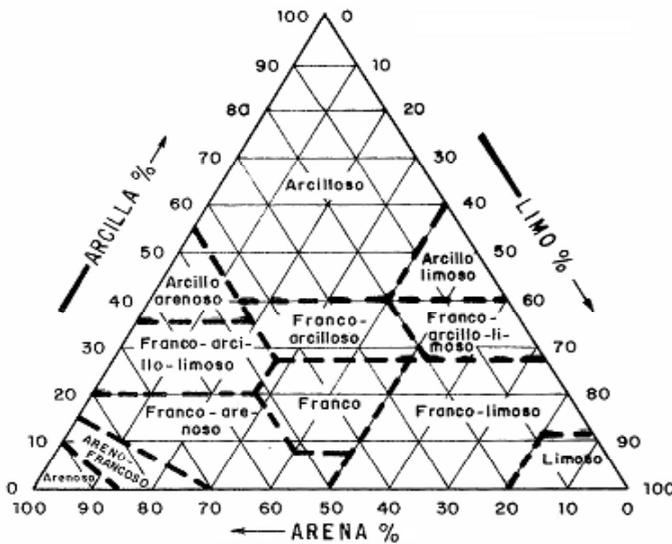


Fig. 3: Triángulo textural (USDA)

Cuadro 1. Escalas más usadas en para calificar las partículas elementales del suelo

Escalas	Medidas (µm)							
	0	2	20	200	2000			
Internacional	Arcilla	Limo	Arena fina	Arenas	Arena gruesa			
USDA, S.S.S.*	Arcilla	Limo	Muy fina	Fina	Media	Gruesa	Muy gruesa	
Medidas (µm)	0	2	50	100	250	500	1000	2000

(*) United States Department of Agriculture. Soil Survey Staff (1951)

2.3. CARACTERIZACIÓN DE LA FASE SÓLIDA DE LA ESTRUCTURA

La estructura se caracteriza por tres propiedades, morfología, consistencia y estabilidad.

2.3.1. Morfología: Distingue, con cierta precisión, las *UEs* según 3 parámetros:

* **El tipo:** la forma de las *UEs*: prismática, bloquiforme, granular, etc.

* **La clase:** el tamaño de cada *UE*: grueso, fina, media, muy fina, muy gruesa.

* **El grado de estructuración:** hasta qué punto el material se halla agregado o suelto: fuerte: Pocas partículas sueltas, la mayoría está agregada; débil: lo inverso. Moderado: intermedio.

2.3.2. Clasificación morfológica: La estructura es objeto de diferentes clasificaciones, según otros tantos criterios. La más difundida -de uso oficial en nuestra cartografía de suelos- es la clasificación morfológica del USDA (Cuadro 2). Como los suelos están sometidos a variaciones más o menos cíclicas, la descripción de su estructura debe efectuarse en condiciones estandarizadas. Si un horizonte está formado sólo por partículas elementales -seltas o compactadas- para el

USDA no hay estructura y las llama grano simple (partículas sueltas, sin cohesión) y masiva o maciza si hay cohesión entre ellas, sin líneas naturales de ruptura. Duchaufour (1960, 1987) denominó E. particular a la primera y E. continua a la segunda, que es frecuente en suelos cultivados, bajo el espesor arado o explorado por la mayoría de las raíces, y en suelos compactados por pisoteo o paso de maquinaria; González Carcedo (2007) propone llamar E. texturales a las de grano simple.

La E. de grano simple es típica de arenales, desiertos y caminos polvorientos por el limo suelto. La falta de cohesión se debe a ausencia o déficit de materiales ligantes (humus, arcilla) y de humedad. La E. masiva se genera con textura favorable (mucho limo, poca arcilla), o compactada por vehículos y arados, por pisoteo de animales en suelo muy húmedo.

Las estructuras fragmentarias poliédricas (Prismas, Columnas, Bloques) se denominan así por sus formas semejantes a esos cuerpos geométricos. Resultan del cambio de volumen que experimentan arcillas expansivas ante la iteración alternada de periodos húmedos y secos, cuya consecuencia es la sucesión de hinchamientos y contracciones,

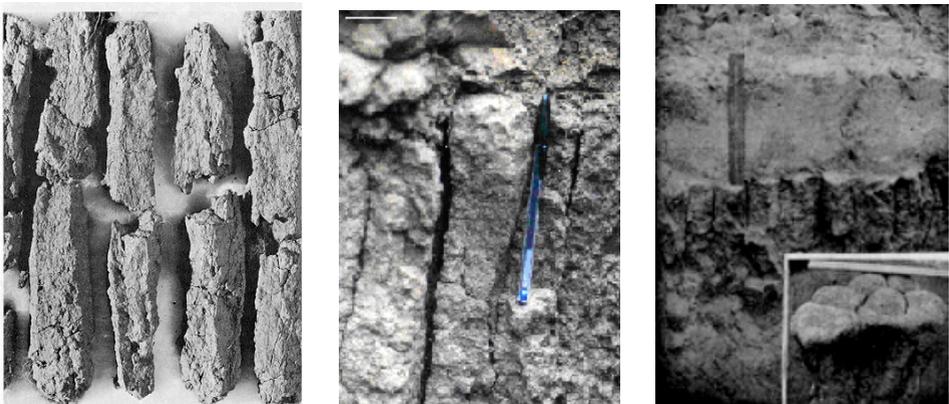
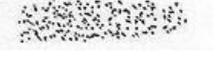
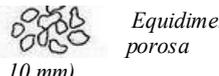
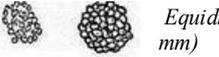
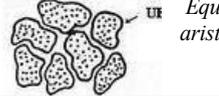
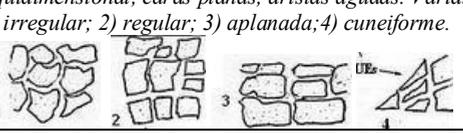
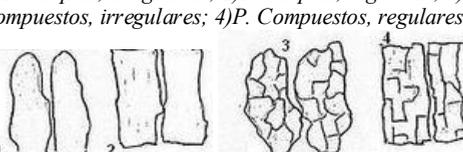
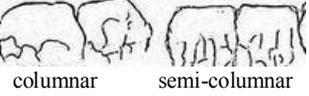


Fig. 4: Estructuras: prismática, semi-columnar (archivos propios) y columnar (Stephens, 1954)

Cuadro 2: Morfología de la estructura (Tipos o formas).

Denominación (USDA, SSS)	CARACTERÍSTICAS	Denominación Internacional
Maciza o masiva	 Compacta, coherente, sin grietas	Continua o masiva
Grano simple	 Partículas elementales sueltas, sin cohesión	Particular o particulada
Granular	 Equidimensional, redondeada, poco porosa (< 10 mm)	Granosa
Migajosa	 Equidimensional, muy porosa (< 5 mm)	Grumosa
Bloquiforme (Bloques subangulares)	 Equidimensional, caras planas, aristas redondeadas (< 5 mm)	Poliédrica subangulosa
Bloquiforme (Bloques angulares)	Equidimensional, caras planas, aristas agudas. Variantes: 1) irregular; 2) regular; 3) aplanada; 4) cuneiforme. 	Poliédrica angulosa
Prismática (Eje vertical más largo que los horizontales)	1) P. Simples, irregulares; 2) P. Simples, regulares; 3) P. Compuestos, irregulares; 4) P. Compuestos, regulares. 	Prismática
Columnar (Eje vertical más largo que los horizontales)	 columnar semi-columnar	Columnar
Laminar (< 10 mm)	Láminas delgadas 	Laminar hojosa (muy delgada); L. escamosa (se curva al secarse por contracción de la arcilla)
Platiforme (> 10 mm)	Láminas gruesas 	En Placas (*)
Fibrosa	Fibras (raíces o similares) 	Fibrosa (Variante: "En copos" o flóculos)

(*) Las clasificaciones europeas reconocen también las estructuras "miga de pan", "vesicular" y "esponjosa", variantes de Maciza y Platiforme con abundantes vacuolas como panal de abejas, generadas por burbujas de gases atrapados en lapsos de hidromorfismo. Indican anegamientos prolongados y aparecen en algunos horizontes E de suelos pampeanos. Ver fotografías en Gaucher (1971) y Hénin et al. (1972).

respectivamente. Esos movimientos compactan a las *UEs* así formadas, pero si se las deja en la superficie, libres de presiones laterales, se fragmentan. Son típicas de horizontes ricos en arcilla y pobres en humus, como los *Bt* de los Argiúdoles. La forma de las *UEs* depende de la calidad del material y del ambiente edáfico.

La actividad biológica (raíces, lombrices, etc.) determina la aparición de estructuras bioconstruidas esferoidales denominadas granular (poco porosa) y migajosa (muy porosa). La primera se forma por efecto principal de las raíces y sus exudados. La migajosa, en cambio, está asociada a la actividad de la fauna edáfica, en especial a las lombrices. Dado su origen estas estructuras se encuentran siempre en la superficie o cerca de ella.

Existen otras clases de estructura que no figuran en el Cuadro 2. Son las E. precipitadas, generadas por precipitación química de sustancias que estaban disueltas. Al hacerlo, forman flóculos (E. floculada) o concreciones (E. concrecionaria). Un ejemplo muy conocido y común es el de las "toscas" calcáreas. Estas se originan cuando en la solución del suelo reaccionan el agua, el CO_2 que expiran las raíces y microorganismos y el Ca disuelto, formando $(\text{CO}_3\text{H})_2\text{Ca}$, sal muy soluble. Al ser esta arrastrada por el agua y llegar a profundidades mayores, donde el *pH* es más elevado, la solución más concentrada u otras causas, el bicarbonato precipita como CO_3Ca , sal poco soluble.

2.3.3. Consistencia. Expresa la resistencia de los agregados a deformarse o romperse ante fuerzas exteriores. En el terreno se la evalúa en tres estados: seco, húmedo y mojado. En los dos primeros casos se aprecia la resistencia a la presión ejercida -sobre el agregado- por los dedos índice y pulgar. En el tercero se amasa una pasta de tierra y agua para evaluar su plasticidad y adhesividad.

La consistencia se debe a la suma de dos tipos de fuerzas: cohesión (sólido-sólido) y adhesión (sólido-líquido). Esas fuerzas varían con la naturaleza y tamaño de las partículas y con su contenido hídrico; hacen que un terrón o un agregado muy húmedo se deforme (plasticidad) o adhiera (adhesividad) y con poca humedad se parta o desgrane (friabilidad). En laboratorio se evalúa midiendo con aparatos el esfuerzo de corte, la resistencia a la penetración (*RP*) y otras variables.

2.3.4. Estabilidad: La ESTABILIDAD ESTRUCTURAL (*EE*) es la capacidad de perdurar de las Ues ante condiciones adversas. Son más estables cuando entre sus partículas hay altas cohesión y adhesión, sea por unión directa o mediante sustancias ligantes.

2.4. CLASIFICACIÓN GENÉTICA

Si bien la clasificación morfológica es la más conocida y utilizada por ser indispensable para clasificación y cartografía de suelos, la formación de *UEs* es parte de los procesos de formación y evolución edáficos. González Carcedo (2007) la denomina estructuración, coincidiendo en que es parte del proceso edafógeno general.

Como la morfología de las *UEs* está íntimamente ligada a los procesos edafógenos que las originan, Duchaufour (1960) opinó que debía subordinarse a ellos. Abogando por una clasificación "genética" de la estructura, sintetizó propuestas de varios autores, incluyendo a Kubiena (1938), autor de la primera de ese género, y propuso 4 tipos principales de estructura, que aquí llevamos a 5.

1. Particuladas: a) Sin cohesión: GRANO SIMPLE; b) Coherente: MASIVA o MACIZADA.

2. Fragmentarias: Por división de unidades mayores: PRISMAS, BLOQUES, COLUMNAS.

3. Bioconstruidas: incluye a las denomi-

nadas GRANULAR y MIGAJOSA del USDA.

4. a) Concrecionarias (o precipitadas): (no incluidas como *UEs* en el esquema morfológico del USDA): a) aisladas: Toscas y concreciones de hierro y manganeso. b) Mantiformes: Losas o mantos de carbonato de calcio (caliche) o de hierro y manganeso.

5. Sedimentarias: LAMINARES y PLATIFORMES.

3. PROCESOS EDÁFICOS QUE GENERAN ESTRUCTURA

La estructuración es una parte del proceso edafógeno general. Se desarrolla mediante ciertos mecanismos (floculación, cementación, adhesión, puentes catiónicos, enlaces de hidrógeno, fuerzas de Van der Waals) con la intervención de los componentes vivos (biota edáfica) o no (arena, limo, humus y oxihidróxidos coloides) dando al suelo su configuración física.

3.1. LOS COMPONENTES

Los principales elementos minerales de un suelo son:

* Minerales de arcilla

* Oxihidróxidos: Óxidos de hierro y aluminio en distinto grado de hidratación y sus hidróxidos.

* Sales solubles (Cloruros, nitratos, algunos carbonatos y sulfatos, bicarbonatos, etc.), iones.

* Sales poco solubles, especialmente carbonato de calcio, sulfato de calcio (yeso).

* Partículas (limos y arenas) de distinta naturaleza según los materiales de origen de cada suelo.

Los componentes orgánicos están constituidos por:

* Restos vegetales (hojarasca, raíces, semillas, etc.) frescos o en proceso de biodegradación;

* Fauna edáfica, en especial mesofauna y lombrices; microflora (algas, hongos, bacterias, etc.).

* Humus (materia orgánica biodegradada y convertida en productos más estables). subdivisión

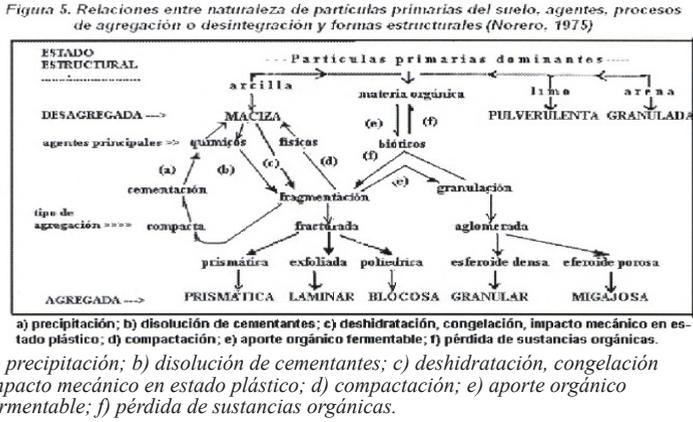
Se destacan, por su rol en la agregación, arcillas y humus. Ambos se unen entre sí y con los oxihidróxidos, directamente o por medio de iones, constituyendo el "plasma", que actúa como adhesivo entre partículas inertes (arena, limo), función que también suele desempeñar el carbonato de calcio. La Fig. 5 esquematiza los procesos (¶ 3.2, ¶ 3.3) que, mediante agentes de tipo físico, químico o biológico, y favorecidos por ciclos de humectación-secado, movilizan partículas, agregándolas en variadas formas o desagregándolas. Esos procesos (a, b, c, d, e, f) están tipificados al pie de la Fig. 5, en tanto que la Fig. 6 clasifica a las sustancias ligantes según su perdurabilidad.

3.2. AGREGACIÓN (BIOCONSTRUCCIÓN)

Las partículas del suelo tienden a agruparse espontáneamente (Norero, 1975) a partir de la floculación de coloides (humus, arcilla) o mediante sustancias adhesivas minerales (sílice, oxihidróxidos, calcáreo) y orgánicas (humus, secreciones y excreciones bióticas). El fenómeno se conoce como agregación, y las partículas formadas, agregados. Las partículas inertes (arena, limo) secas carecen de cohesión; mojadas adquieren una débil adherencia que pierden al secarse. Se unen entre sí mediante plasma (arcilla, humus, gel de oxihidróxidos) y forman MICROAGREGADOS (μag) que pueden adherirse formando MACROAGREGADOS (*Mag*).

La Fig. 7 esboza las uniones posibles entre componentes de un agregado primario a partir de la agregación entre arena, limo y plasma, según sus varias posiciones de adherencia.

Fig. 5: Relaciones entre naturaleza de partículas primarias del suelo, agentes, procesos de agregación o desintegración y formas estructurales (Norero, 1975).



a) precipitación; b) disolución de cementantes; c) deshidratación, congelación, impacto mecánico en estado plástico; d) compactación; e) aporte orgánico fermentable; f) pérdida de sustancias orgánicas.

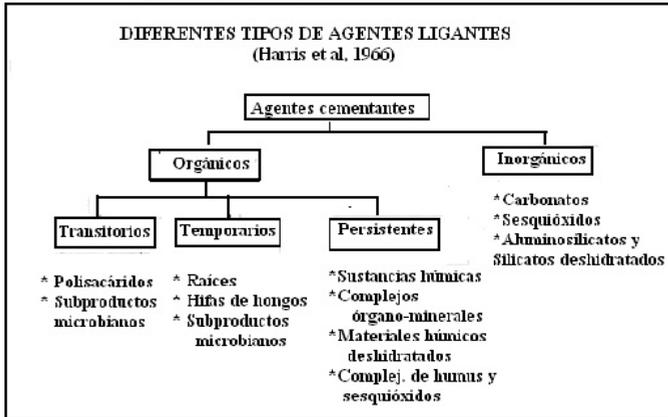


Fig. 6: Clasificación de ligantes por durabilidad (Harris et al., 1966, según Lal & Shukla, 2004).



Fig. 7: Microagregado de arena unidas por arcilla y humus. H: arena-humus-arena; B: arena-humus-tactoid; C: tactoid-humus-tactoid. Las arcillas se unen en C1: cara-cara; C2: borde-cara; C3: borde-borde; G: borde-borde; G: tactoid-tactoid, cara-cara (Emerson, 1959; Norero, 1975).

A medida que crece la proporción de material coloidal, que actúa como pegamento, sus partículas se unen entre sí y con las inertes, formando agregados primarios. La unión entre arcilla y humus, y de arcillas entre sí (Fig.8) considera que las cadenas orgánicas de humus (μ) tienen cargas positivas (+) y negativas (-) y que las arcillas, que en general poseen cargas (-) en sus bordes, también pueden tenerlas (+) en sus caras externas.

En los ejemplos de la Fig. 8 la acción de cada enlace depende de la composición del humus, del *pH* del medio y del tipo de arcilla, todo subordinado al proceso edafógeno que allí se desarrolla.

Las cargas de arcillas y humus les permiten unirse directamente o mediante cationes, aunque la mayoría de los agregados granulares resultan de la acción biológica. Así, en la formación de *Mag* por unión de μag (Fig. 9) hay filamentos de hongos y actinomicetos,

que proliferan durante la biodegradación de rastrojos y otros restos orgánicos (Monnier, 1965).

La unión de μag para formar *Mag* fue objetada por Oades (1984) para quien las partículas elementales se unen primero formando *Mag*, que luego se dividen en μag . Es posible que ambos mecanismos coexistan.

En general, los agregados de un suelo presentan una jerarquía por tamaño, como la textura. Mientras disminuye el tamaño aumenta la cohesión entre ellos. Inversamente, la cohesión decrece y aumenta la porosidad al unirse agregados menores y formar otros mayores. (Cuadro 3).

La formación de *UEs* es favorecida por los siguientes mecanismos:

- a) Floculación y coagulación de los coloides, uniéndolos.
- b) Dilatación axial de las raíces, que comprimen su entorno y cohesionan partículas

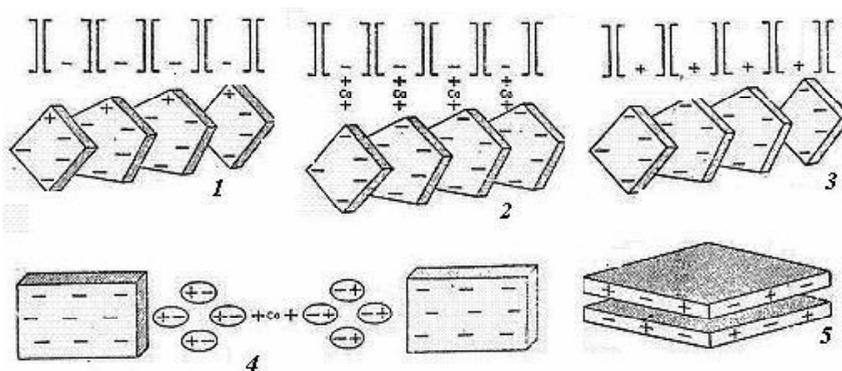


Fig. 8: Posibles formas de unión entre arcillas y humus (Thompson, 1962).

Referencias: 1. Enlace químico de humus (-) con cargas (+) de las arcillas. 2. Enlaces químicos (-) de ambos coloides por un puente cationico de calcio, hierro o hidrógeno. 3. Enlace químico (+) de humus con cargas (-) de arcillas. 4. Enlace arcilla (-) y arcilla (-) mediante cationes entre moléculas de agua polarizadas: las partículas se hallan en medio acuoso y se acercan al secarse el suelo (Russell, 1950); 5. Superposición de láminas de arcilla en medio húmedo, orientan sus cargas al secarse lentamente (Page, 1955) y generan estructura laminar.

c) Secreciones y excreciones de la biota, que actúan como pegamento.

d) Alternancia de lapsos humectación-secado (dilatación-contracción).

e) Aporte de materiales adherentes (cal-cáreo, cemento, polímeros, ciertos efluentes, etc.).

3.3. FRAGMENTACIÓN

Consiste en la subdivisión o fractura de UEs mayores en otras menores. En este mecanismo juegan un papel preponderante la expansión (al humectarse) y la contracción (al secarse) de los materiales. Como esa es una cualidad de las partículas coloidales, la fragmentación es propia de horizontes que

contienen arcillas expansivas y es prácticamente inexistente en suelos arenosos o con poca arcilla.

El detalle íntimo del mecanismo sigue caminos distintos, según el medio químico genere floculación o dispersión de las partículas coloidales, en este caso la arcilla.

Si la arcilla coagula al humectarse, sus laminillas forman flóculos más o menos sueltos, resultantes de uniones aleatorias y desordenadas de sus cristales (Norero, 1975), con agua intercalada entre ellas. Al secarse gradualmente las láminas se aproximan y reorientan y el flóculo se compacta. En cambio, si al embeberse se dispersa, sus laminillas tienden a repelerse y formar un gel

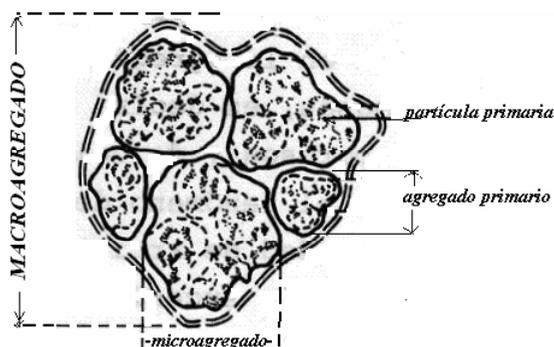


Fig. 9: Macroagregado integrado por microagregados, a su vez formados agregados primarios, y estos por partículas primarias (Norero, 1975).

Cuadro 3. Organización jerárquica de agregados según tamaño y composición (*)

Tamaño de las UEs	Denominación	Componentes usuales
0,02 μm	Láminas de arcilla	Minerales de arcilla
0,05 μm	Cristales de arcilla	
1 – 5 μm	Dominios o tactoides	
≈ 50 μm	Flóculos (Clusters)	arcilla, limo
50 – 250 μm	Microagregados (μAg)	arcilla, humus, limo, arena: (a, h, l, A)
> 250 μm	Macroagregados	microagregados, a, l, A
≈ 1.000 μm (1 cm)	Límite superior de agregados granulares	microagregados, a, l, A, Mat. Org. Fresca

(*)Fuentes: Monnier (1965), Tri (1968), Tisdall & Oades (1982), Quirk (1994).

en lugar de flocúlos. Luego, al deshidratarse, las partículas se reorientan y acomodan paralelamente por la repulsión de sus cargas. En el primer caso (floculación) aparecen numerosas líneas de ruptura y se generan agregados pequeños con aristas redondeadas (Ej.: bloques subangulares). Esto es favorecido por la abundancia de calcio y se observa en la parte inferior de muchos horizontes iluviales cuyo complejo de intercambio está saturado con calcio (*Btk*); en el segundo (dispersión) aparecen grietas verticales alejadas y paralelas delimitando prismas o columnas, éstas últimas en horizontes con abundante sodio y/o magnesio. Cuando secas, las *UEs* se separan formando grietas que se convierten en vías de flujo preferencial; pero al embeberse se hinchan y cierran totalmente, dificultando el avenamiento interno, que disminuye hasta hacerse escaso o nulo. Como éstas *UEs* requieren estructuras arcillosas expansivas, en la región pampeana se encuentran en los horizontes *Bt* (Fig. 4), donde su presencia suele constituir una barrera para la penetración radical (Orellana, 1990; Pilatti & Grenón, 1995).

3.4. CEMENTACIÓN

Agregación y fragmentación son procesos reversibles si las condiciones ambientales lo favorecen. De lo contrario, la fragmentación continua puede desembocar en degradación del suelo. En cambio, la cementación sería un caso particular de agregación irreversible. Pero el mecanismo de este proceso es muy distinto, ya que se trata de una precipitación en el sentido químico del término. El fenómeno se produce cuando un agente cementante muy estable (óxidos de hierro, aluminio, silicio o manganeso) une partículas, constituyendo concreciones muy resistentes e irreversibles en las condiciones edáficas en las que se formaron.

Concreciones comunes son las de carbonato de calcio, generadas por reacción del anhídrido carbónico de la respiración de la biota edáfica con agua y calcio del suelo. Sui están floculadas son frágiles, algo solubles, reactivas e interactúan con las raíces. Cuando se combinan con sílice son duras e insolubles. Se presentan como: a) Nódulos aislados (toscas, tosquillas, muñecas) llenando huecos dejados por la biota muerta, en especial raíces; b) Mantos continuos, impermeables al aire, al agua y a las raíces. En el origen de estos mantos calcáreos suele participar agua subterránea alcalina sódica.

3.5. SEDIMENTACIÓN

Al llover sobre un suelo desnudo, el agua destruye terrones y arrastra partículas finas (limo, arcilla). Si por alguna causa se estanca, el suelo se encharca y el material suspendido sedimenta. Las partículas decantan lentamente: las más gruesas primero y finalmente las más finas, formando estructuras laminares, llamadas *sello* -cuando están húmedas- y *costras* al secarse. Al decantar, se orientan y acoplan de modo tan cerrado que “sellan” los primeros milímetros de la costra, lo cual obstaculiza la emergencia de plántulas e impide el ingreso de agua -incluso de aire- al perfil, restringiendo su recarga hídrica. Como éste fenómeno es propio de la superficie, el hallazgo de estructura laminar en un horizonte profundo indica que ese horizonte fue alguna vez superficial y luego cubierto por material erosionado en otro sitio.

4. LA FASE FLUIDA

Se dijo en el apartado «Concepto y definición de estructura edáfica» que gran parte del interés en estudiar la fase sólida conllevaba

la idea de garantizar la existencia de una trama porosa adecuada para el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Y en gran parte lo es, ya que la estabilidad de la fase sólida se vincula con la persistencia de la configuración de la fase fluida; pero no la caracteriza cualitativa ni cuantitativamente.

4.1. POROSIDAD (P_o)

Obviamente, un componente tan importante no pasó inadvertido y desde antaño existen técnicas para medirla, bajo el nombre de POROSIDAD (P_o). La técnica más difundida consiste en pesar un volumen conocido de suelo seco (P_s), llenar totalmente su trama porosa con un líquido (agua, mercurio, kerosén, etc.) y volver a pesarlo "húmedo" (P_h); la diferencia ($P_h - P_s$) se debe al peso del fluido introducido en la muestra, el cual, relacionado con su densidad, equivale al volumen de poros o huecos (V_h).

Para calcular la POROSIDAD TOTAL (P_{ot}) se aplica la fórmula: $P_{ot} = (V_h / V_s) \cdot 100$, donde P_{ot} es la porosidad total (%); V_h = volumen de huecos; V_s = volumen de suelo.

Aunque, P_{ot} varía (35% en suelos compactos y 60% en capas superficiales sueltas) en suelos santafesinos esta variación es poco importante y P_{ot} oscila alrededor del 50% de V_s . Pero, dentro de la porosidad misma hay variaciones de calidad que influyen en muchos fenómenos edáficos, como circulación de fluidos, penetración de raíces, actividad de la fauna edáfica, etc.

Sin embargo, pese a la simplicidad y al uso muy difundido de su medición, existen fuentes de inexactitud que cabe considerar si se requiere cierta precisión. Por ejemplo, al usar agua como fluido, se dilata la muestra (si no está confinada), haciendo que el volumen del suelo seco difiera del que tiene en húmedo. Con muestras confinadas no varía el volumen, pero la porosidad medida es menor

que la del suelo seco, lo cual no coincide con la receptividad hídrica del suelo natural. Para evitarlo puede usarse otro fluido; pero aún admitiendo la utilidad de esta medición, queda por averiguar qué volumen de agua puede retener el suelo y - sobre todo- qué porción de esa agua es utilizable por las plantas.

4.2. CONFORMACIÓN DE LA TRAMA POROSA

Los agregados y las partículas elementales no son estrictamente regulares ni coincidentes; entre ellos quedan huecos que eventualmente son ocupados por aire, agua o ambos. La Fig. 10 da una idea de las variadas formas y tamaños que pueden presentar.

En la práctica, interesan dos tipos de poros o huecos:

* Los muy estrechos, de orden aproximadamente capilar, retienen agua; ésta sólo puede circular entre puntos con distinta energía de retención hídrica (3 y 4 en la Fig. 10) y dentro de los agregados. Esa parte de la trama porosa se conoce como MICROPORO-SIDAD (μP_o).

* Los de mayor grosor MACRO-PORO-SIDAD ($M P_o$)- incapaces de retener agua., son vías preferenciales del avenamiento interno y de recarga rápida de horizontes profundos (Fig. 10: 1, 2, 5, 6). Los hay de distinto origen: desde grietas, generadas al secarse los horizontes con arcillas expansivas, hasta bioporos, resultantes de la actividad biológica (raíces, lombrices, etc.).

Monnier *et al.* (1973) y Stengel (1979) diferenciaron dos fases de la trama porosa: extraporosidad e intraporosidad, según los espacios se sitúen fuera o dentro de los agregados, respectivamente. Aunque no se corresponden exactamente, suelen ser comparables con $M P_o$ y μP_o .

Green & Ampt (1911) según Hamblin (1985), y Six *et al.* (2004) resaltaron la importancia de evaluar la extraporosidad

(formas y dimensiones de la trama porosa) antes que las dimensiones de los agregados. Hamblin (1985) y Six *et al* (2004), tras un exhaustivo y detallado estudio de los poros, los clasifican según el potencial capilar que pueden ejercer sobre el agua, y a los bioporos según sus dimensiones y qué miembros de la biota los generan. La *MPo* -y en especial los bioporos- constituyen la principal opción de avenamiento interno de los suelos, de suma importancia en la recarga hídrica profunda, y son estimados hoy como vía específica del denominado flujo (hídrico) preferencial.

4.3. CÓMO CUANTIFICAR LA TRAMA POROSA

Desde la primera mitad del siglo XX° se fue desarrollando el conocimiento de la relación entre POROSIDAD (trama porosa total) y sus contenidos hídrico y de aire. El Cuadro 4 resume los principales puntos críticos del agua edáfica sugeridos por diferentes autores.

En 1927, Veihmeyer denominó Agua útil a la contenida entre *CC* y *PMP* (Cerana, 1959, Wild, 1992); esto tuvo gran aceptación y su uso se generalizó. Aún hoy muchos autores lo usan.

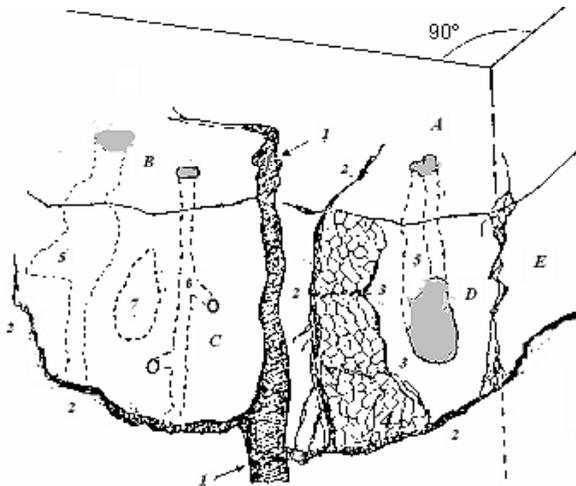


Fig. 10: Componentes de la porosidad del suelo. Se ve, en perspectiva, un plano horizontal (A y B) y caras verticales (C, D, y E) de una porción de suelo, donde: 1) Grieta gruesa. 2) Grietas menores que delimitan unidades estructurales (Ues). 3) Fisuras finas, que determinan subestructuras. 4) Canaliculos de muy pequeño diámetro, en 3). 5) Huecos grandes (Ex-raíces o cuevas) que atraviesan agregados Ej.: de la cara A hasta la cara D, y de la B a la opuesta). 6) Galería tubular abierta por una lombriz, con salidas sobre las caras B y C. 7) Hueco aislado, sin comunicación con los planos de separación de los agregados, salvo por medio de finos canaliculos del tipo 4. (Nota: las dimensiones relativas se alteraron para no exagerar las proporciones de la figura: las dimensiones de 1, 2 y 6, fueron reducidas; las de agregados de la subestructura (3 y 4) están algo aumentadas. Según Gaucher (1971) modificado.

Cuadro 4. Estados hídricos detectados por diferentes autores.

Calificación		Denominaciones		Poros llenos		Tensiones equivalentes			
				%	Φ (μm)	pF	cm	Atm.	kPa
Excedente hídrico		Agua gravitacional con desagüe rápido		10	>50	1,77	60	0,06	6
Agua Útil	Agua Fácilmente Utilizable	Capacidad de campo (CC)		50	50	2	100	0,1 (0,3-0,6)	10 (33-60)
		Agua gravitacional de desagüe lento		Indefinida, con valores intermedios entre CC y CR					
	Capacidad de retención (CR)			8	2,54	346	0,6	59	
	Humedad equivalente				3	1.000	1,0	98,1	
	Ruptura del lazo capilar (RLC)			3					
	Utilizable con dificultad creciente	Puntos de Marchitez	Temporaria (PMT)				10	9,8	
			Permanente (PMP)		25	0,2	4,18	15.000	15
Agua no utilizable		Hidrosopicidad		15	0,06	4,48	30.600	50	49
		Agua de constitución (límite incierto: agua de hidratación de las moléculas minerales)							

El agua edáfica es retenida con tensión creciente a medida que su volumen declina. Incluso varía el valor de CC de cada suelo, según su textura y estructura. Por eso otros autores propusieron más puntos críticos, como CR (Capacidad de retención) además de CC y otros. Varios de ellos están en desuso y sólo se incluyen aquí para ilustrar la relación entre distintas categorías de poros y la dinámica hídrica.

Así, el “Agua gravitacional de desagüe rápido” engloba a poros incapaces de retener agua que, en caso de saturación temporaria, la evacuan rápidamente salvo impedimentos de drenaje. En ese renglón se ubica la MACROPOROSIDAD (MPo), que normalmente contiene aire (1, 2, 5 y 6 en la Fig. 10).

Las tres categorías siguientes denuncian la dificultad que implica medir el máximo de agua útil para las plantas. Una vez evacuada la MPo, aparece el agua fácilmente utilizable (AFU) por las plantas. Pero en suelos de textura fina, más que un punto aparece el intervalo CAPACIDAD DE CAMPO-CAPACIDAD DE RETENCIÓN,

tipificado como AGUA GRAVITACIONAL DE DRENAJE LENTO, retenida en poros intermedios entre MPo y μPo . Ese intervalo, de dimensión indefinida y casi nulo en suelos arenosos, resalta la dificultad para determinar el límite superior del agua útil -en suelos de textura fina, donde el tiempo necesario para vaciar esos poros varía entre 1 y 2 días. Esto permite que parte de esa agua pueda ser utilizada por las plantas.

El punto denominado HUMEDAD EQUIVALENTE DE CAMPAÑA (Field Capacity) ratificó esa imprecisión al sustituir CC por una medida de laboratorio, centrifugando muestras molidas y saturadas, a 1.000 veces la aceleración de la gravedad. Al destruir la trama porosa original, el dato obtenido se vincula con la textura y no con la estructura, por lo cual su uso generalizado decayó. Hoy se prefiere evaluar CC sobre muestras inalteradas sometidas a una succión de 10 kPa. (Silva *et al.*, 1994).

A medida que el suelo drena, van creciendo las fuerzas de retención hídrica y, tras superar el RLC -propuesto por autores rusos y de uso escaso- se llega a los puntos

de MARCHITAMIENTO TEMPORARIO (Cerana, 1959) y PERMANENTE (*PMT* y *PMP*, respectivamente).

El *PMP* es bastante preciso. Su medición directa es difícil, pero se puede calcular con funciones de edafotransferencia: Pilatti (1989) lo hizo a partir del tenor de arcilla. Pero el impreciso *PMT* varía para cada situación suelo-planta-clima. Pilatti & Grenón (1995) lo sustituyeron por LIAFU (LÍMITE INFERIOR DEL AGUA FÁCILMENTE UTILIZABLE) que incluye la influencia de esas variables.

Entre *PMT* (o *LIAFU*) y *PMP*, el agua es utilizable con dificultad creciente, por lo que no cabe incluir ese tramo en el agua fácilmente utilizable, en suelos de textura fina.

A partir de *PMP*, el suelo retiene agua con tensiones que impiden su uso por los cultivos.

EL INTERVALO HÍDRICO ÓPTIMO (IHO)

En el ítem anterior recurrimos a las fuerzas de retención hídrica para diferenciar los tipos de porosidad, con la ventaja de hacerlos coincidir con uno de sus principalísimos motivos de estudio.

Llamamos Intervalo Hídrico Óptimo (*IHO*) al contenido hídrico del suelo tal que las raíces de las plantas superiores puedan respirar, absorber agua y expandirse sin restricciones que afecten su crecimiento. Concretamente, es un tramo del contenido hídrico del suelo dentro del cual:

- * el agua es fácilmente utilizable por el cultivo,
- * la masa sólida del suelo es horadable por las raíces sin ofrecer mayores resistencias, y
- * la aeración no es limitante para la respiración radical.

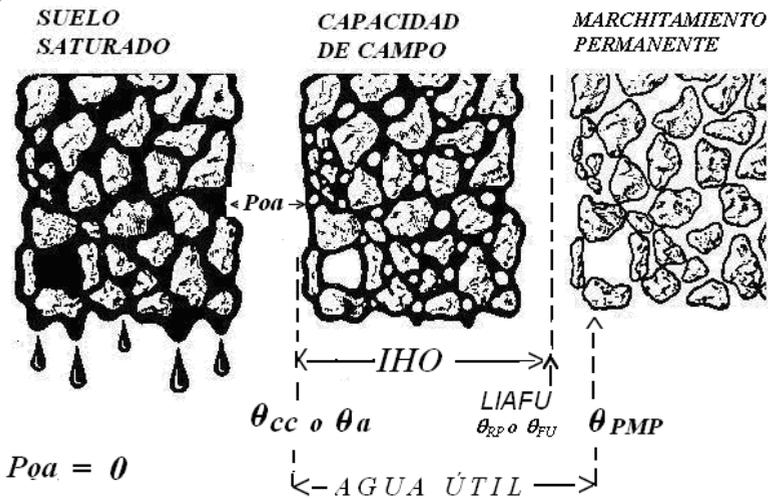


Fig. 11: Estados hídricos y puntos críticos del IHO (Modificación de Buckman & Brady, 1966: 171). En suelo saturado todos los poros están ocupados por agua y no queda aire. Entre ese estado y CC, la porosidad aérea (*Poa*) va creciendo. El IHO comienza a partir de CC siempre y cuando $Poa \geq 15\%$; si no, el límite superior del IHO ocurre cuando se asegura una adecuada aeración (*a*). El límite inferior del IHO está determinado por θ_{RF} o θ_{RP} (el que ocurra primero).

Obsérvese que el *IHO* integra tres variables: MACROPOROSIDAD (*MPo*), AGUA FÁCILMENTE UTILIZABLE (*AFU*) y RESISTENCIA MECÁNICA A LA PENETRACIÓN RADICAL (*RP*), de modo que durante dicho intervalo las raíces no hallan mayores dificultades para ocupar volúmenes crecientes de suelo ni para absorber agua y disponer de oxígeno suficiente.

4.5.- EL MODERNO CONCEPTO DE *IHO*

Con la idea de elaborar una variable integradora, que reflejara la influencia del agua edáfica sobre el desarrollo de los cultivos, Letey (1985) propuso, hipotéticamente, la noción de *NLWR* (Non Limiting Water Range), que limita el agua disponible entre *CC* y *PMP* a contenidos hídricos en los cuales la resistencia mecánica del suelo a la penetración radical (*RP*) y la aeración no afectan significativamente el crecimiento vegetal.

Pilatti & Orellana (1993) llevaron a la práctica dicho concepto, denominándolo *IHO* y sustituyendo el antiguo intervalo de Agua Útil *CC-PMT* de Veihmeyer, por el Intervalo de Agua Fácilmente Utilizable (*IAFU*) configurado por Norero (1980). Simultánea e independientemente, Silva *et al.* (1994) desarrollaron la propuesta de Letey como “Least Limiting Water Range” (*LLWR*). *IHO* y *LLWR* apuntan a un objetivo común, difieren en sus límites -superior e inferior- y con ello en sus dimensiones. Pero, pese a las diferencias en el cálculo, ambos poseen la misma base teórica, de modo que el *IHO* existe configurado desde 1993 siendo usado en varios países (Pilatti *et al.*, 2007).

La Fig. 12 expresa gráficamente al *IHO* en el horizonte A franco limoso de un Argiudol ácuico típico del centro de Santa Fe. La curva superior muestra la relación entre *RP* y el contenido hídrico del suelo (θ); la otra es la curva de retención hídrica: $\Psi_m = f(\theta)$, siendo

Ψ_m el potencial mátrico. En este caso el *IHO* es el agua edáfica contenida entre θ_a y θ_{FU} (contenido hídrico del *LIAFU*).

Las variables que delimitan el *IHO* son:

θ_{6kPa} : volumen de agua retenida con una tensión de 6 kPa y reemplaza a *CC*. En la Fig. 11 no aparece por ser superior a θ .

θ_a : Volumen de porosidad aérea al alcanzar *CC*. En la Fig. 12 el mínimo aceptable para θ fue 10% del volumen de poros. Hoy se exige como limitante θ_a a 15% (Pilatti & Orellana, 2008).

θ_{RP} : Contenido hídrico por debajo del cual las raíces no pueden horadar el suelo. En la figura, $RP = 6MPa$, valor crítico para la técnica usada (Orellana, 1989; Orellana *et al.*, 1995).

θ_{FU} : Límite Inferior del Agua Utilizable (*LIAFU*). Por debajo comienza el estrés hídrico: el agua ya no está fácilmente disponible, las plantas no pueden mantener la tasa de evapotranspiración potencial y comienzan a cerrar estomas. El valor del *LIAFU* cambia con cada cultivo, suelo y situación climática. Norero (1980) elaboró un protocolo de cálculo utilizando datos meteorológicos, edáficos y específicos del cultivo en cuestión. Pilatti & Grenón (1995) desarrollaron un software para su cálculo automático.

Luego, *IHO* es el volumen de agua edáfica retenido entre 6kPa ó θ_a (el valor menor) y RP ó θ_{FU} (el valor mayor) y caracteriza a la fracción de la trama porosa más útil para los cultivos. En la Fig. 12 queda acotado entre 0,38 y 0,22 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ (0,16 $cm^3 \cdot cm^{-3}$). El *IHO* varía entre horizontes de un mismo suelo, y en cada horizonte si cambia su trama porosa o la consistencia (compactación u otra causa).

Dada la íntima relación entre *IHO*, estructura y “Calidad” del suelo (Pilatti *et al.*, 2008) se han elaborado ecuaciones de edafotransferencia que permiten establecer el *IHO* a partir de la densidad del suelo (Silva

et al., 1997), como ilustra la Fig. 13, tomada de Tormena *et al.* (1999). Pilatti *et al.*, (2008) al valerse del IHO como instrumento para diagnosticar niveles de “calidad del suelo” utilizaron ese gráfico, modificado, para mostrar la relación entre el IHO y dichos niveles de calidad.

5. DEGRADACIÓN DE LA ESTRUCTURA

5.1. IMPORTANCIA

La degradación edáfica abarca varios aspectos, entre los cuales se destaca el físico, que condiciona el hábitat de la biota,

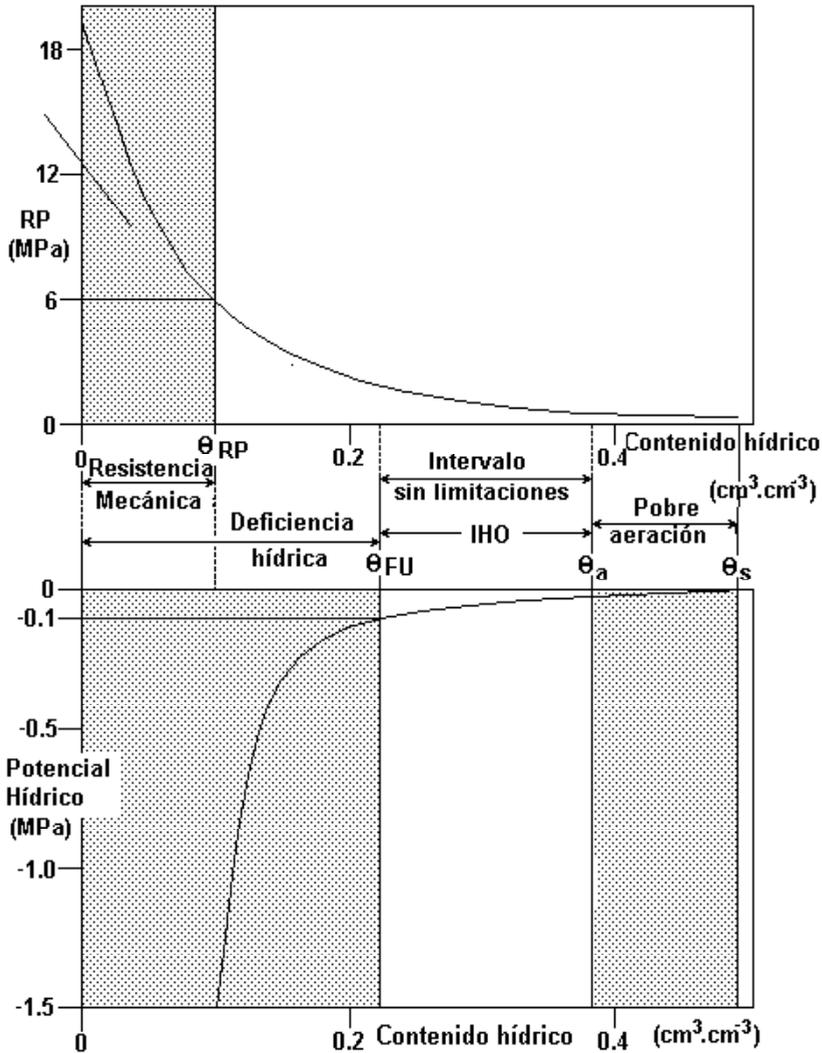


Fig. 12: Gráfica del IHO y sus límites (RP: resistencia a la penetración, s saturación, a límite supe-rior (más húmedo) del IHO, RP inicio limitación por impedancia; FU: el agua deja de estar fáci-lmen-te disponible: límite inferior (menos húmedo).

la circulación de agua y nutrimentos y -en definitiva- el crecimiento y desarrollo de las plantas, afectando así el rendimiento de los cultivos, manifestación indirecta de la degradación edáfica. Se oye hablar de "suelos cansados".

5.2. MANIFESTACIÓN

¿Cómo se manifiesta esa degradación? Puede ser observando la estructura y evaluando su calidad (morfología, estabilidad (EE), consistencia de las UEs). Pero la morfología es un rasgo cualitativo y no siempre evoluciona con rapidez; aunque puede expresar etapas de degradación. El Cuadro 5 describe la estructura del horizonte A de tres lotes, de un mismo suelo, con distinta intensidad de uso. Se observa cómo esos horizontes pierden su fuerte estructura granular original hasta llegar a compactarse (estructura masiva). Los agregados, fuertemente organizados al principio, se tornan débiles

(baja cohesión) y en la serie Esperanza hasta aparece limo suelto como muestra de disgregación.

En tales casos, la descripción *del PER-FIL CULTURAL* (Hénin *et al.*, 1972, De Battista *et al.*, 1993) enumera otros rasgos edáficos propios de la degradación física, entre los cuales se destaca la interrelación entre suelo y sistemas radicales (Manichon, H., 1987; Tardieu, 1984; De Battista, 1993).

Una forma indirecta de apreciar EE es siguiendo la evolución de la tasa de infiltración (*Icum*) por lluvia sobre una cama de agregados. Pilatti *et al.* (2003) aplicaron para ello la técnica de Nacci & Pla Sentis (1989), en ensayos que permitieron distinguir la magnitud de los mecanismos de golpeteo y estallido, por separado y conjuntamente (16.2.4). La Fig. 16 muestra la evolución de *Icum* durante una hora en dos muestras de un mismo suelo: una protegida con una cubierta de paja y la otra desnuda.

Cuadro 5: Cambios morfológicos en la estructura por intensidad de uso (Orellana *et al.*, 1997) *

Suelo	Uso	Estructura (Morfología)
Argiudol típico, serie Reconquista	Nunca cultivado	Granular media, fuertemente estructurado
	13 años de agricultura convencional	Granular media, débilmente estructurado
	15 años de agricultura convencional	Bloques subangulares débiles
	30 años de agricultura convencional	Masiva
Argiudol típico, serie Esperanza	Nunca cultivado	Granular media, fuertemente estructurado
	10 años agric. convencional, 3 pastura	Granular media, moderadamente estructurado
	10 años de agricultura convencional	Bloques subangulares finos, débiles
	18 años de agricultura convencional	Masiva + grano simple (limo)
Argiudol típico, serie Murphy	Nunca cultivado	Granular media, fuertemente estructurado
	7 años agric. convencional, 4 pastura	Granular media, moderada + bloques subangul.
	13 años agric. convenc., 7 sólo cincel	Bloques subangulares finos, débiles.
	4 años pastura, 7 agric. convencional	Masiva

* Las descripciones corresponden -en cada caso- al final del último período nombrado.

5.3. CAUSAS, MECANISMOS Y CONSECUENCIAS

La susceptibilidad a la degradación es inherente a cada suelo. No depende del manejo (Lal, 1993), aunque el mal manejo es lo que provoca o acentúa dicha degradación. Ésta abarca fenómenos de distinta naturaleza e intensidad. Casi siempre los estudios se refieren a la degradación de la estructura superficial, cuyas principales causas pueden ser:

a) Percusión hídrica: golpeteo de la lluvia sobre el suelo desnudo.

b) Dilatación diferencial: Al mojarse, agregados heterogéneos se dilatan más en algunas partes que en otras y el desfase provoca su ruptura.

c) Dispersión por riego con aguas bicarbonatadas sódicas.

d) Contaminación con efluentes industriales.

e) Compactación: por compresión, debida a pisoteo animal, paso de maquinaria, o disgregación previa de la estructura según el ítem anterior (encostramiento, masificación).

f) Uso inadecuado: sobrepastoreo, labranza excesiva, monocultivo, etc. (Cuadro 6).

En los 2 primeros casos, el agua es agente exclusivo de la desagregación. En c) y d) participa asociada a otros agentes. El golpeteo de a) puede romperlos, sobre todo cuando ya los mojó, pues cuando los terrones se humectan absorben agua por capilaridad y se intercala agua entre las partículas, atenuando las fuerzas de cohesión y adhesión que las unían.

Además, cuando un agregado se sumerge, a las fuerzas de cohesión entre partículas se opone una presión interior, o capilar (P_c) -ejercida por el aire ocluido- que tiende a romperlo. Si hay conductos suficientemente grandes (macroporos) que dejen salir el aire, favoreciendo la estabilidad de los agre-

gados; de lo contrario, el agregado "estalla". Yoder (1936) ideó esa hipótesis, verificada por Hénin (1948; 1976), quien propuso la ecuación $EE = C - P_c$, según la cual existe estabilidad estructural (EE) si las fuerzas de cohesión (C) superan a la presión capilar (P_c).

Otros factores coadyuvan a la desagregación. Uno es el riego con aguas bicarbonatadas sódicas, que dispersan los coloides y éstos sueltan las partículas unidas por ellos. Lo mismo sucede cuando se vierten efluentes que contienen esas u otras sustancias dispersantes.

Algunas industrias (como la láctea) suelen verter aguas residuales con cloruro de sodio que, en principio, no es dispersante sino floculante, pero aumenta la presión osmótica de las soluciones del suelo, restringiendo la absorción de agua por las plantas y afecta a la biota edáfica. Su eliminación es cara y difícil, derivando en sodificación, salvo que se trate de suelos arenosos y profundos.

La compactación (e) se ve favorecida cuanto más húmedo está el suelo, lo que facilita su apelmazamiento. De allí que se desaconseje el pastoreo directo y el paso de maquinaria en lotes muy húmedos. En estos casos, lo que disminuye drásticamente es la ínterporosidad -en general MACROPOROSIDAD- permaneciendo poco alterada la intraporosidad (MICROPOROSIDAD).

En cuanto al manejo irracional (f) induce compactación (por pisoteo) o biodegradación del humus si favorece su excesiva oxigenación, e incide negativamente sobre la biodiversidad edáfica. Todo eso desemboca en degradación de la estructura.

Cuando un agregado se moja, puede romperse por estallido, por hinchamiento y dispersión, por dilatación diferencial y por golpeteo. Con tierra seca y humectación brusca predomina el mecanismo de estalli-

do, pero si la humectación es lenta y permite la expulsión gradual del aire contenido en los agregados, ese fenómeno pierde intensidad y adquieren importancia los demás.

5.4. CONSECUENCIAS

En ¶5.3-a, el estado consecuente es el "planchado" del suelo, formando costras de estructura laminar (ver ¶3.4), mientras que en ¶5.3-b la masificación puede ser también subsuperficial. Es común en la región pampeana la degradación originada por riego con aguas subterráneas bicarbonatadas-sódicas (¶5.3-c), que provocan la dispersión de los coloides que mantienen unidas a las partículas (Fig. 6), disminuyendo así su cohesión y disgregándolas. Las partículas dispersas dan origen a costras en superficie y masificación de los horizontes afectados, incluso subsuperficiales. El efecto de la aplicación de efluentes debe ser tratado particularmente en cada caso. Existen ensayos regionales de aplicación de suero lácteo, donde debe controlarse la salinidad y el pH, entre otros parámetros. Los efluentes sanitarios urbanos (tratados) son utilizados en otros países, destacándose en la Argentina lo realizado en San Carlos de Bariloche, Mar del Plata y Corrientes (Constantino, 2005)

Cabe destacar que, aparte de los casos específicos señalados en 5.3-c, la compactación es casi siempre el estado final del suelo superficial cuando su textura es limosa y la falta de pendiente impide la pérdida de suelo por erosión.

5.5. EFECTOS DE ALGUNAS PRÁCTICAS AGRÍCOLAS

Cultivos. Los cultivos -como toda vegetación- interactúan con el suelo. Las plantas nativas aportan hojarasca y los cultivos rastrojos, enriqueciendo al suelo en materia orgánica y fomentando su actividad biológica interna. Esos aportes dependen de la

dimensión de la canopia, cuya biomasa varía para cada cultivo; por ejemplo, sorgo y maíz aportan mucho más que trigo o soja, cuyos rastrojos son menores y, si el clima favorece la biodegradación, pueden dejar al suelo descubierto. Si el follaje es denso protege al suelo del golpeo pluvial. Además, durante el desarrollo se genera -entre plantas- un microclima distinto del de la atmósfera externa. Las raíces, por su parte, exploran el suelo, se internan entre los agregados, por grietas y -si la consistencia lo permite- horadan la fase sólida, generando macroporos de gran importancia para la biota y la dinámica de los fluidos. En la rizosfera, las secreciones radicales, la microflora y la fauna edáficas inducen la agregación de partículas sólidas. A su vez, el suelo sostiene físicamente a la planta y la nutre a través de sus soluciones. Pero si la estructura es desfavorable y su consistencia impide la expansión radical, dificulta el crecimiento y desarrollo del cultivo. Este fenómeno es particularmente restrictivo en horizontes subsuperficiales, como los pisos de arado y los Bt de algunos Argiudoles.

Numerosos trabajos prueban que la permanencia de la vegetación -natural, o cultivada con labranzas convencionales- favorece al estado físico del suelo, generalmente en el siguiente orden: SUELO VIRGEN CON VEGETACIÓN NATIVA > PRADERA PERMANENTE CON GRAMÍNEAS > PRADERAS CON LEGUMINOSAS > CULTIVOS ANUALES DE GRAMÍNEAS > OTROS CULTIVOS ANUALES > MONOCULTIVO (degradante).

Tallarico *et al.* (1973) valoraron EE en 22 lotes de un Argiudol de la región pampeana, durante 3 ciclos de cultivo: a) bajo alambrado, b) con pasturas permanentes y c) con cultivos anuales (maíz), hallando que EE decaía en el orden: a>b>c. Brandinelli de Sardi *et al.* (1978) en experiencia similar, eva-

Cuadro 6: Estabilidad de agregados del horizonte A bajo diferentes sistemas radicales (*)

Sistemas radicales	Cultivo y edad	Agregados estables (%)	Macroporos (%)		
			A	BA	Bt1
Raíces pivotantes	Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>) 3 años	22	20	15	4
	Lotus (<i>Lotus corniculatus</i>) 5 años	25	20	19	12
	Soja perenne (<i>Glicine javanica</i>) 7 años	28	17	14	5
	Promedio ?	25	19	16	7
Raíces fasciculadas	Falaris (<i>Phalaris tuberosa</i>) 2,5 años	35	27	11	7
	Gramma Rhodes (<i>Chloris gayana</i>) 3,5 años	28	18	16	10
	Cebadilla chaqueña (<i>Bromus auleticus</i>) 6 años	31	18	17	13
	Promedio ?	31	21	15	10
Testigos	Sin vegetación ni remoción; 7 años	9	13	8	4
	Promedio ?	8,5	10,5	7,5	3

(*) Pilatti et al, 1987

luaron *EE* decreciente en: pastura mixta degradada, invadida por *Cynodon* sp., no pastoreada en 15 años > pastura de cebadilla híbrida de 10 años, degradada y enmalezada, no pastoreada > monocultivo de maíz 7 años, incorporando rastrojos, no pastoreado > barbecho desnudo.

Pilatti et al. (1987) evaluaron cambios inducidos en un Argiudol por sistemas radicales de plantas forrajeras. El Cuadro 6 extracta lo referente a MACROPOROSIDAD en los 3 primeros horizontes y *EE* del horizonte A. Se cotejan 3 forrajeras con raíces pivotantes y 3 con fasciculadas, contra 2 testigos: una parcela desnuda sin remoción y otra con verdes y 2 remociones anuales.

Se observa que las raíces fasciculadas generan más agregados estables que las pivotantes y que ambas superan holgadamente a los testigos, cuya estructura se ha degradado.

Aceptando que debajo del 5 % la MACROPOROSIDAD es totalmente limitante, y semilimitante entre 5 y 10 %, se comprobó que casi todas las raíces fascicu-

ladas eliminaban esa limitación en los 3 horizontes, mientras que las pivotantes sólo mejoraron la porosidad, respecto de los testigos, en el A (aunque menos que las fasciculadas) y en el BA.

Si bien muchas experiencias como las citadas muestran qué cultivos son más favorables que otros para la estructura, no es conveniente extrapolar tal información a casos puntuales -sobre todo en lo cuantitativo- pues los valores obtenidos dependen, para cada sistema planta-clima-suelo, de la duración del ensayo, de la toma de muestras (número de extracciones que la componen, espesor de suelo abarcado, época del año, etc.) y de la técnica usada para evaluar *EE*.

Labranzas. El arado es considerado como un hito histórico en el desarrollo de la civilización ¿Por qué ahora muchos estigmatizan o rechazan su uso? Por la misma razón que un medicamento, beneficioso en dosis adecuadas, se torna nocivo si se abusa de él. En la primera mitad del s. XX hubo muchos ensayos para establecer fehacientemente

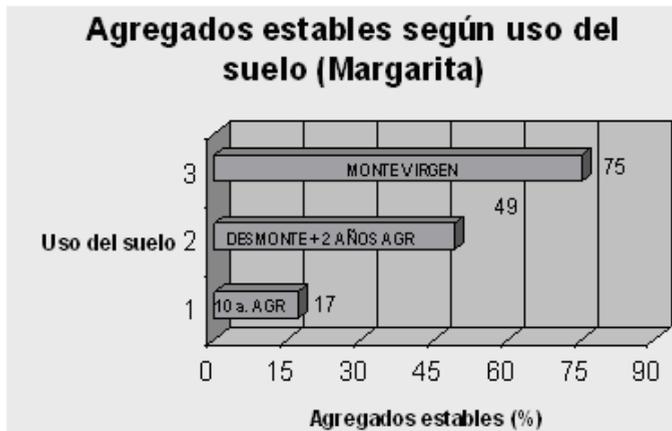


Fig. 14: Degradación de un suelo desmontado y degradado por uso inadecuado (Orellana & Pilatti, 1994).

qué beneficios produce arar: Sólo quedó en pie la eliminación temporal de malezas, competidoras del cultivo por agua y nutrientes (Papadakis, 1954).

Un ejemplo de la degradación por labranza se muestra en la Fig. 14, elaborada con datos obtenidos en 3 lotes de un mismo suelo en Margarita, en el NE santafesino.

La merma de rendimientos llevó a aplicar labranzas conservacionistas, de las cuales la siembra directa desplazó a la mayoría de las demás. Hay otras alternativas para recuperar calidad edáfica, como implantar praderas; así lo muestran ensayos que las incluyen en rotación, pero eso implica reorientar la explotación incluyendo ganadería, en desmedro de la alta rentabilidad aparente de otros cultivos. Aparente cuando no incluye, como costo, la pérdida de calidad y productividad del suelo, reposición de nutrientes y reparación de la degradación física producida

Las labranzas convencionales activan la oxigenación de la materia orgánica y con ello su biodegradación; baja el tenor de humus, se emite más CO_2 a la atmósfera y se altera

cuantitativa y cualitativamente la trama porosa. En el Dep. Las Colonias (Santa Fe) el tenor orgánico se redujo un 30 % en 50 años (Orellana *et al.*, 1988a, 1988b) y creció la fragilidad del suelo. En las pendientes se produjo o agravó la erosión hídrica y en sitios llanos la lluvia sobre suelos desnudos generó costras superficiales cuyo sellado limitó el ingreso de agua al perfil y el intercambio gaseoso suelo-atmósfera.

También afectan a la agregación y a la estabilidad de agregados, rompen la continuidad de los macroporos, reducen la biodiversidad edáfica y la actividad de la macrofauna. Esa alteración modifica el balance hídrico y los ciclos del agua, del carbono y de los nutrientes principales. El suelo se torna propenso a la compactación y susceptible a la erosión, queda sujeto a desequilibrios nutrientes por déficit de algunos y exceso de otros y se extreman los regímenes térmico e hídrico. Si embargo, usada criteriosamente, combinada con otras medidas de restauración, la labranza puede ayudar a revertir esas tendencias y a promover la recuperación del suelo (Lal, 1993).

6. CONTROL DE LA ESTRUCTURA

De lo hasta aquí desarrollado se desprende la necesidad de controlar periódicamente la estructura. Pero ¿Qué es lo que se debe y puede controlar? ¿Cómo y cuándo hacerlo?

6.1. ¿QUÉ EVALUAR?

Las unidades estructurales se caracterizan por 3 parámetros: morfología, estabilidad y consistencia (§2.3). La configuración general de cada horizonte incluye, además, a la trama porosa.

La descripción morfológica expresa el estado físico de la fase sólida en un momento dado. Pero la evaluación es cualitativa para el tipo (forma) y semicuantitativa para la clase (tamaño) y la consistencia. Ésta, descripta habitualmente in situ, depende además de la sensibilidad del operador y del tenor de humedad del suelo en ese instante. Además, cambios tan drásticos como los del Cuadro 4 se perciben tras varios años, lo que no permite un control eficaz más frecuente, mediante este rasgo.

En cambio, la estabilidad de los agregados y su consistencia pueden ser evaluadas más objetivamente mediante ensayos de laboratorio.

6.2. ESTABILIDAD DE AGREGADOS

Ésta es una de las propiedades edáficas más controvertidas y -por ende- más estudiada. Como se dijo en §1.1, para acceder a una producción sostenible el suelo no sólo debe poseer una estructura adecuada, sino que ella debe ser perdurable (estable).

La estabilidad de agregados plantea, “prima facie”, dos interrogantes:

- a) ¿A que llamamos estabilidad de agregados?
- b) ¿De qué clase de agregados se trata?

Dada la anarquía existente en la práctica -en cuanto a criterio y metodología- es necesario tratar ambas cuestiones, pues la técnica idónea para cada caso depende del tipo de suelo en cuestión.

6.2. ¿QUÉ ES ESTABILIDAD?

Repasando las causas de degradación enunciadas (§5.3) se observa que el agua actúa como agente del proceso en las 6: en las 4 primeras como requisito indispensable y en las demás complementando a otros factores. Luego, la inmersión de los agregados en agua parece adecuada y la mayoría de los métodos la aplica. Así, se dice que un agregado es estable si no se disgrega al ser sumergido en agua o cuando ésta lo golpea en forma de lluvia (Golpeteo o percusión).

6.2.1. ¿De qué agregados se trata? Cabe recordar (§2.1) que “estructura de un suelo es la configuración de sus fases sólida y fluida” (Kay & Angers, 2000) y que de la calidad de la fase fluida dependen:

- * la capacidad del suelo para captar, retener agua y aire, así como permitir su circulación;
- * la posible expansión del sistema radical de los cultivos;
- * la aptitud del suelo como hábitat para su biota.

Pero esa calidad depende de la configuración de la fase sólida, cuyos agregados le dan forma y dimensión. Entonces ¿Qué agregados pueden generar poros que cumplan con aquellas funciones? En la superficie del suelo, al menos, agregados granulares. Éstos son esferoidales y la porosidad entre ellos depende de su tamaño y disposición espacial ¿Qué diámetro conviene a los poros situados entre los agregados? Cálculos y experiencias sugieren que, para que los poros puedan retener agua a 60 kPa (equivalente a capacidad de campo) su grosor debe ser de

60-70 μm (Orellana & Pilatti, 1994) para lo cual el diámetro crítico de los agregados que los generan, rondaría los 0,2 mm. Poros mayores permiten la circulación hídrica y contienen aire, y menores retienen agua. Luego, la estabilidad de los *Mag* 0,2 mm es la que interesa. Es favorable un alto tenor de esos *Mag*, ya que partículas menores (μag , arenas finas, limo, arcilla dispersa) se intercalan entre ellos y reducen la MACROPOROSIDAD (Fig. 15), afectando al flujo líquido en favor de su retención.

No obstante, otros autores (Amézketa, 1999) valoran agregados de 0,5-1 mm, 1-2 mm, <2 mm, 2-2,8 mm, 2-4 mm, 3-4 mm, <4 mm, 1-8 mm, 5-8 mm. Le Bissonnais (1996) y Amézketa (1999) separan agregados de varios tamaños y luego calculan, como referente, el Diámetro Medio Ponderado (*DMP*) según el peso de cada fracción (De Leehneer & De Boodt, 1958).

Otros evalúan también μag y partículas dispersas < 200 μm . Hénin *et al.* (1958) los integraron como factor negativo en una fórmula con los *Mag* estables. Emerson (1967) aplicó sucesivos tratamientos para dispersar y aislar partículas según su grado de cohesión y tamaño; Le Bissonnais y Amézketa (op. cit) valoran en una sola técnica varios mecanismos: percusión, estallido, hinchamiento y dispersión.

Tisdall & Oades (1982) disgregaron muestras de suelos y clasificaron las fracciones resultantes por tamaño (0,2-2 μm , 2-20 μm , 20-250 μm), detectando distintos agentes ligantes en cada grupo. Por otro lado, Parton *et al.* (1987) diferenciaron fracciones de humus según su perdurabilidad (semanas, meses, años, décadas, siglos); de ellas, sólo las dos primeras, presentes en *Mag* > 250 μm se vinculan en lo inmediato con el manejo, por lo que se propuso distinguir dos clases principales de agregados:

* Macroagregados (*Mag*) > 250 μm , formados por otros más pequeños unidos por agentes orgánicos temporarios (hifas de hongos y raíces) y transitorios (principalmente polisacáridos), lo que los hace dependientes del manejo del suelo.

* Microagregados (μag), < 250 μm , ligados por agentes orgánicos persistentes (compuestos aromáticos resistentes, asociados con cationes metálicos polivalentes y polímeros fuertemente absorbidos). Eso los haría característicos de cada suelo e independientes del manejo.

Elliot & Coleman (1988) y Six *et al.* (2004), a partir de los trabajos citados, establecieron una escala jerárquica de la porosidad edáfica según sus dimensiones, ligada estrechamente a la de agregados, y asignaron a cada nivel la función de albergar

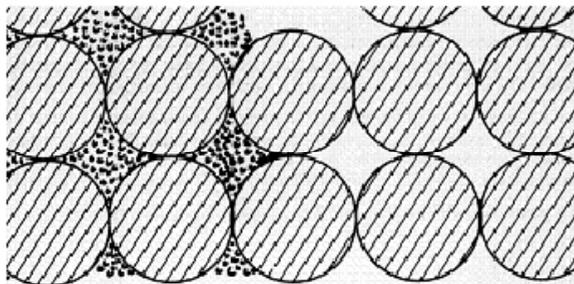


Fig. 15. Partículas finas ocupando macroporos (Hénin, 1976)

componentes específicos de la biota edáfica: microartrópodos en Macroporos; nemátodos en huecos entre *Mag*; protozoos, pequeños nemátodos y hongos en espacios entre *mag* y bacterias dentro de los *mag*. Además, el humus de cada nivel de dicha escala jerárquica posee una composición particular. Este grado de detalle muestra la importancia que tiene cada nivel de estructura como hábitat y ayuda a comprender cómo es afectada la actividad biótica al degradarse la estructura, en especial cuando se aplican agroquímicos, efluentes u otros productos.

Como se ve, hay una relación entre los distintos componentes orgánicos y los tipos de agregados. Esa relación fue intuitiva mucho antes, como surge de trabajos que separan la materia orgánica del suelo en dos fracciones denominadas: liviana, libre o joven -la más lábil- y pesada, ligada o vieja, la más estable (Hénin y Turc, 1949, Monnier *et al.*, 1962, Andriulo *et al.*, 1991).

Pero como la composición de los agregados no cambia bruscamente a partir de un diámetro dado, los resultados obtenidos con distintas mallas difieren, razón por la cual, para poder comparar datos nuevos con otros anteriores, cada laboratorio debe mantener su técnica sin variantes.

De aquí la importancia que tiene, para la dinámica de los fluidos edáficos, que un suelo posea toda una escala jerárquica de agregados, de dimensiones específicas, según las funciones que cumplen: los *Mag* garantizan la dinámica de los fluidos; los *mag* la retención hídrica. Para eso conviene determinar el ESTADO DE AGREGACIÓN, según se verá luego.

6.2.3. Tenor y Estado de agregación (*Tag* y *E°ag*) El procedimiento corriente para evaluar *EE* consiste en tomar una muestra de suelo seco al aire, de peso inicial (*Pi*) y someterla al tratamiento correspondiente; el

peso seco final (*Pf*) de los *Mag* incólumes, relacionado con el inicial y referido a 100 se toma como porcentaje de agregados estables: $EE (\%) = 100 Pi / Pf$.

Pero, si se parte de una muestra de suelo completa, no se sabrá si, además de los agregados considerados estables, el resto es material desagregado, agregados lábiles o una mezcla de ambos en cierta proporción, cuya variación puede tener importancia, por afectar a la dinámica de los fluidos.

En cambio, si antes de evaluar estabilidad de los *Mag* se los separa de las partículas menores (*mag* y material desagregado), refiriendo el peso seco de lo retenido en el tamiz al de la muestra total, se tiene la tenor de agregación” (*Tag*), dato importante, lamentablemente poco utilizado.

$Tag = \text{Peso de los } Mag / \text{Peso de la muestra}$

Hay discrepancias sobre qué técnica elegir: unas efectúan tamizados en seco, otras en agua; otras en líquidos no polares. También difieren las aberturas de malla de los tamices empleados. Esas discordancias dificultan la comparación de resultados entre técnicas distintas. En muchos trabajos se omite el dato y sólo se informa el porcentaje de agregados estables contenidos en el total de la muestra, desconociéndose de cuánto material agregado se partió. Si, como Monnier (1965), apartamos el material desagregado y se procesan (previa pesada) los agregados restantes, se podrá calcular *Tag* y *EE*.

Si se desea mayor información sobre el material agregado, bastará reemplazar el tamiz de 200 o 250 μm por una batería de tamices de distintas aberturas y se tendrá el “estado de agregación” (*E°ag*) o “distribución granulométrica de los agregados”, separados como en el análisis granulométrico elemental, pero en este caso sin agregar un dispersante para destruir los agregados.

(Tri, 1968).

La idea de conocer el estado de agregación no es nueva. En 1926, en una reunión en Rothamsted (Inglaterra), se estableció un método llamado “Análisis granulométrico B” en el cual se separaban las partículas por suspensión en agua, sin pretratamiento químico; y en 1930, Gollán diseñó y usó un aparato que separaba partículas por levitación, suspendidas en contracorriente de agua (Demolon, 1960); ese tipo de ensayo se aplicó en los primeros estudios de suelos santafesinos (Gollán & Lachaga, 1939); luego cayó en desuso porque mientras el material permanece en suspensión algunos agregados se rompen, alterando la escala natural que se quería conocer.

Aún disponiendo de una técnica aceptable para evaluar el $E^{\circ}ag$, que exprese la distribución granulométrica de los agregados, eso no bastaría para calcular valores críticos de

retención ni de flujo hídrico, que dependen también de la disposición espacial de las partículas, como muestra la Fig. 15.

Para superar esa dificultad habría que efectuar mediciones paralelas de infiltración y retención de agua y vincular matemáticamente los resultados mediante funciones de edafotransferencia.

Así como valorar la estabilidad de los *Mag* (que son sensibles al manejo) permite un control rápido de su estado de conservación, la evaluación de su distribución por tamaño puede ampliar esa información, en especial cuando se comparan los resultados obtenidos por dos técnicas de distinta agresividad: una baja y otra alta. Por eso De Leenheer y De Boedt (1958) propusieron separar agregados de varios diámetros, con una batería de tamices (¶7.2).

6.2.4. EE Y TASA DE INFILTRACIÓN (I_{CUM})

Para evaluar la tasa de infiltración a través

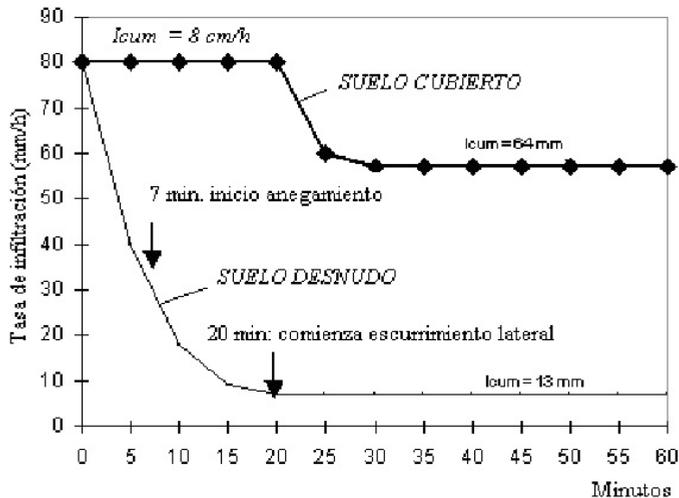


Fig.16. Infiltración a través de un sello superficial: Con cubierta protectora de paja (trazo grueso) y descubierto (trazo fino), en un Argiudol con labranza convencional. I_{cum} = agua infiltrada en 60 min.

del "sello" superficial de un suelo se coloca, en un simulador de lluvia, una cama de agregados (de entre 2 y 4 mm), de 2 cm de espesor y provocar una precipitación de 8 cm h⁻¹. Debido al tamaño de los agregados, la trama porosa es amplia y permite, durante un tiempo, el paso de **toda** la lluvia caída (Fig. 15, trazo superior): la tasa de infiltración permanece constante e igual a 8 cm.h⁻¹. Entretanto, en la curva inferior, los agregados -desprotegidos- son destruidos por golpeteo y estallido. Las partículas desagregadas obturan gradualmente la trama porosa, formando un sello superficial; la tasa de infiltración disminuye y la curva, decreciente, toma una forma típica. Las mediciones agua infiltrada se toman:

- (1) Cuando se observa acumulación de agua en superficie (encharcamiento);
 - (2) Cuando el agua encharcada comienza a escurrir;
 - (3) A los 20 minutos y
 - (4) Al cabo de una hora.
- Al evaluar Isello se destacan 2 mecanis-

mos de ruptura de agregados: estallido y golpeteo. En la Figura 16, la curva superior refleja la pérdida de infiltración ante la destrucción de agregados sólo por estallido, ya que la cubierta protege del golpeteo. En cambio, la inferior integra ambos mecanismos destructivos. Se puede apreciar la magnitud relativa de cada uno aceptando que son aditivos y relacionando los valores de *Icum* en cada curva.

6.3. CONSISTENCIA

La consistencia se evalúa, midiendo diferentes propiedades, según la finalidad del estudio. Atterberg había establecido, a principios del siglo XX ciertos puntos críticos que aún hoy se conocen como "límites de Atterberg" y son utilizados en ingeniería civil al estudiar las fundaciones de obras.

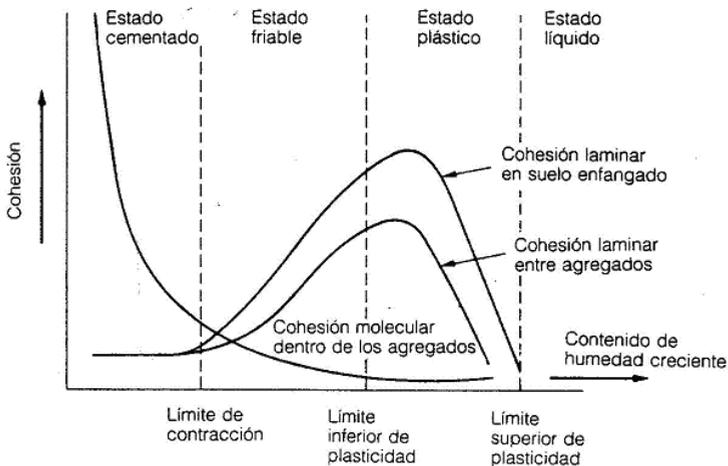


Fig. 17: Variación de la cohesión con el contenido de humedad (Adaptado de Spoor, G., *Soil Physical Conditions and Crop Production, MAFF Tech. Bull., N° 29, 128, HMSO, 1975*). Wild, 1992.

La Fig. 17 representa los cambios de estado de un suelo en función de su contenido hídrico. Partiendo de un suelo seco y sólido (estado cementado, en la figura) se llega a un punto crítico denominado LÍMITE DE CONTRACCIÓN, que se determina secando una muestra previamente embebida y corresponde a la contracción del volumen de una masa de suelo por pérdida de agua.

A partir de allí comienza la zona de friabilidad o fragilidad, durante la cual, al ejercer presión creciente sobre un agregado, éste se rompe bruscamente. Esto es frecuente en agregados granulares, y especialmente en los migajosos, de suelos pampeanos bien provistos de humus.

Incrementando el contenido hídrico se alcanza el LÍMITE INFERIOR DE PLASTICIDAD (LÍMITE PLÁSTICO de Atterberg), a partir del cual el material, en vez de romperse cuando se lo presiona, se deforma y hasta puede ser amasado.

Finalmente, si aumenta el agua retenida, se llega al LÍMITE SUPERIOR DE PLASTICIDAD (LÍMITE LÍQUIDO de Atterberg), a partir del cual el material se torna fluido. En las pendientes, marca el tenor a partir del cual hay erosión por flujo del suelo superficial y hasta aludes de barro.

Normalmente, el estado hídrico apto para labranzas se halla entre los límites superior e inferior de plasticidad, en tanto que la diferencia entre ambos es el ÍNDICE DE PLASTICIDAD, de uso habitual en obras civiles.

Pero la consistencia también es evaluada, a través de otras variables inherentes a ella, como:

* La RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN (*RP*) o IMPEDANCIA MECÁNICA (Arkin & Taylor, 1983), íntimamente ligada a la posibilidad de expansión radical y de emergencia de las plántulas;

* La TENSIÓN DE TRACCIÓN, o el ÍNDICE DE CONTRACCIÓN, y la

FRIABILIDAD (*F*), que evalúan la cohesión interna de agregados secos y la presión máxima que pueden soportar;

* El ÍNDICE DE COMPACTACIÓN, que pondera efectos del contenido hídrico, la presión y la composición mineral y orgánica sobre la susceptibilidad a la compactación de diferentes suelos;

* El COEFICIENTE DE EXTENSIBILIDAD LINEAL (COEL), que cuantifica la capacidad de dilatación de horizontes. Se aplica especialmente a horizontes arcillosos;

* El ÍNDICE DE CONTRACCIÓN, opuesto al COEL, también importante en horizontes con alto contenido de arcilla;

* El ESFUERZO DE CORTE (y otros de usados en ingeniería civil): no se trata en este texto.

6.3.1. Resistencia a la penetración (*RP*).

La resistencia (de un suelo) a la penetración radical, es la fuerza que éste opone a un vástago de punta cónica que lo penetra. Su valor es un índice integrado de las siguientes variables edáficas: compactación (densidad), estado hídrico, textura, tipo de arcilla, contenido orgánico y estructura, todas las cuales se vinculan con la consistencia.

RP se mide con penetrómetros, de los cuales existen variados modelos. Los hay de campo (Bradford, 1986) y de laboratorio; los primeros son manuales, menos precisos y generalmente se limitan a medir la impedancia en el estado de humedad que tiene de cada horizonte edáfico en el momento de la medición. Pero dan medidas rápidas y permiten comparar lecturas contemporáneas en un mismo suelo. Los de laboratorio, que son más precisos, permiten efectuar mediciones en diferentes estados hídricos y así conocer mejor el comportamiento del sistema suelo-raíces.

Pfeffer (1893) fue el primero en medir con éxito la presión ejercida por las raíces en un

mismo suelo. Los de laboratorio, que son más precisos, permiten efectuar mediciones en diferentes estados hídricos y así conocer mejor el comportamiento del sistema suelo-raíces.suelo. A tal punto que el tema fue prácticamente abandonado hasta que Veihmeyer & Hendrickson (1948) demostraron que *RP* podía reducir el crecimiento radical y con ello afectar el normal desarrollo de las plantas. El tema fue nuevamente abordado y hubo considerables progresos entre 1960 y 1970. La medición de *RP* fue recomendada por Arkin & Taylor (1981), Bowen (1981) y otros.

RP se aplica en el cálculo del límite inferior del *IHO* (Ítem 4.4), cuando la consistencia para el contenido hídrico correspondiente (*RP*) ya no permite o restringe la expansión radical.

6.3.2. Coeficiente de extensibilidad lineal (COEL). Se utiliza para cuantificar fenómenos de contracción y dilatación en suelos. Es un elemento de diagnóstico para detectar horizontes “vérticos”, cuya elevado índice de expansión-contracción provoca el llamado “self mulching” o auto-labranza, propio de los Vertisoles. Orellana (1989) y Orellana & Pilatti (1990) lo emplearon para comparar horizontes *Bt* con altos valores de *COEL*, en su estado natural y tratados con enmiendas cálcicas, comprobando que éstas reducían significativamente el *COEL*.

6.3.3. Tensión de tracción (TS) y Friabilidad (F). La TENSIÓN DE TRACCIÓN (*TS*) y la FRIABILIDAD (*F*) -energía de rotura de agregados- se calculan por compresión axil (o axial) de agregados secos, en medio no confinado, hasta su ruptura.

Así como los valores de *EE* dependen de la cohesión de los agregados al mojarse, *TS* y *F*, que caracterizan la cohesión en seco, son válidas para ser relacionadas con cargas

mecánicas, como el pisoteo animal y el paso de maquinaria. Además, Watts & Dexter (1998) opinan que la friabilidad es una importante propiedad en suelos agrícolas por ser un rasgo deseable para que la labranza establezca una cama de siembra adecuada (Imhoff *et al.*, 2002).

Así como las labranzas afectan la aptitud productiva del suelo, el crecimiento de cultivos ha sido relacionado con la cohesión de los agregados (Imhoff *et al.*, 2002). Se halló que valores *altos TS* y *bajos de F* concordaban con bajos rendimientos (Ley *et al.* (1993) según Imhoff *et al.* (2002)).

6.3.4. Índice de compactación. Como se dijo, los suelos secos son poco reactivos al pisoteo. Pero en húmedo se compactan, por lo que, además de la cohesión es útil conocer la susceptibilidad edáfica a la compactación, lo cual se consigue mediante el cálculo de un índice de compactación. Éste se mide aplicando una carga axial sobre una muestra de suelo confinada lateralmente, saturada de agua.

7. ASPECTOS METODOLÓGICOS

Haremos aquí breves comentarios sobre métodos y técnicas usuales, sin entrar en detalles, para los cuales convendrá acudir a los respectivos protocolos citados.

7.1. TOMA DE MUESTRAS

Ante todo son muy importantes, aunque no siempre debidamente considerados, la toma de muestras y su acondicionamiento previo a los ensayos en sí. Cabe recordar el proverbio “El análisis no puede ser mejor que la muestra” Jackson (1982) y aceptar que es fundamental tomar en cada lote muestras compuestas por un alto número de extracciones. La técnica recomendada para estos

ensayos, se describe en Orellana (1982) y Pilatti & Orellana (1987, 1994).

En el caso de la *EE* es muy importante tener en cuenta la época de muestreo respecto del clima y del manejo del lote, la profundidad y espesor de muestreo (Hofman, 1975) y el estado hídrico del suelo. Todos esos factores condicionarán el resultado de los ensayos.

Como ejemplo de la variabilidad de la *EE* se presenta la Fig. 18, en la cual se aprecia un brusco aumento de *Mag* > 0,2 mm al incorporar enmiendas orgánicas; éstas reactivan la microflora edáfica, con proliferación de hongos cuyas hifas unen *mag* para formar *Mag*.

Pasado el período de máxima actividad microbológica (semanas o meses, según la naturaleza de la enmienda), comienza a decaer el número de *Mag* persistentes, que tiende a estabilizarse cuando la materia orgánica se ha biodegradado y queda el humus estable. El tiempo que dura cada etapa depende de la calidad del material incorporado y del ambiente edáfico (temperatura, humedad, composición del suelo, etc.). Todo

eso debe tenerse en cuenta para estandarizar muestreos y al interpretar resultados.

7.2. ESTABILIDAD ESTRUCTURAL (*EE*) O DE AGREGADOS

El agua puede destruir agregados por percusión, hinchamiento y dispersión, o por estallido. Los ensayos de percusión se aplican a casos de suelos desnudos; si están cubiertos no actúa la percusión y los ensayos procuran provocar los otros mecanismos (*EE*) o reducirlos al mínimo (*Tag*). Es el caso de manejos que mantienen siempre al suelo protegido con vegetación, viva o muerta. (Fig. 15)

La elección de una técnica adecuada depende del suelo en cuestión. En suelos arenosos o pedregosos carece de sentido separar agregados con un tamiz de 200 o 250 μm , ya que la granulometría elemental está formada por partículas mayores que la abertura de malla del tamiz y casi todo el material, incluyendo partículas elementales, será retenido.

Algunos someten a tratamientos previos a las muestras, antes de tamizarlas en agua.

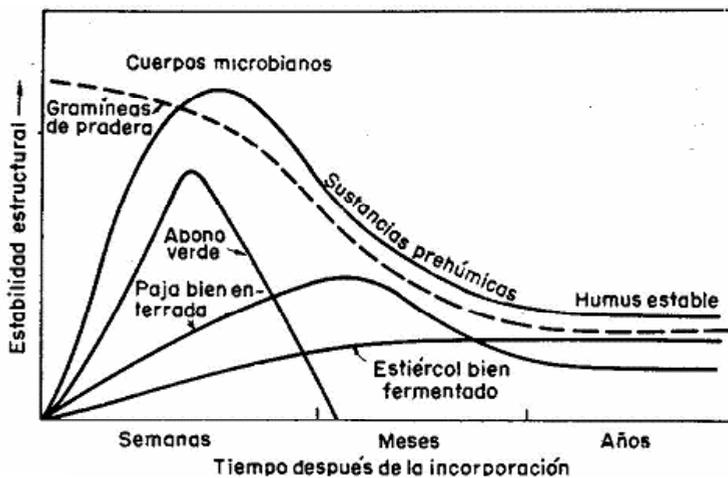


Fig. 18: Evolución en el tiempo del porcentaje de agregados estables de un suelo al incorporar enmiendas orgánicas (Monnier, 1965, según Eaver et al., 1973)

Hénin *et al.* (1958; 1972) fraccionaron la muestra en tres partes: a una le agregaban alcohol, a otra nada y a la tercera, benceno. Luego se adiciona agua a las tres, se agitan y se tamizan en agua. El alcohol elimina el estallido, el agua lo produce y el benceno lo acentúa, salvo en agregados bien provistos de humus, en cuyo caso el benceno (hoy descartado por razones sanitarias) actúa como protector.

El ensayo propiamente dicho -análisis de agregados- se basa (en la mayoría de los autores) sobre el tamizado en agua del material tratado, variando la energía de agitación, el número de tamices utilizados y sus aberturas. De resultados de esto la muestra queda dividida en dos o más fracciones (según el número de tamices utilizados): los agregados que quedan retenidos (estables) y el material que los atraviesa, compuesto por μag y material disperso.

Los agregados retenidos son secados y pesados. En algunos casos el ensayo termina aquí, y se relaciona matemáticamente esa pesada con el peso inicial de la muestra. En otros, el material fino que atravesó el tamiz es evaluado y se integra a la fórmula con los datos anteriores (Hénin *et al.*, 1958). Emerson (1967), en cambio, efectúa dispersiones sucesivas del material, aplicando energía creciente en cada una, y estima la resistencia a la dispersión. Otros autores evalúan la arcilla dispersable como indicador de inestabilidad (Abu-Sharar *et al.*, 1987a, 1987b, Shanmuganathan, & Oades, 1983).

De Leenher & De Boodt (1958) separan, por tamizado en seco, todos los *Mag* -lábilis y estables- fraccionados por tamaño, pesan cada fracción y calculan el diámetro medio ponderado (*DMP*), repiten la operación tamizando en agua y relacionan ambos *DMP* (en seco y bajo agua). Esta técnica, muy difundida, detecta la ruptura de *Mag* mayores en otros más pequeños, alertando sobre la

existencia de un proceso de desagregación (ver *E'ag*). Pero mientras esos *Mag* superen el diámetro crítico (200-250 μm) no alteran sustancialmente propiedades importantes como la dinámica hídrica.

Hénin *et al.* (1972) evaluaron *EE* indirectamente, midiendo velocidad de infiltración (V_i) de una muestra perturbada, en embudo cilíndrico (se debe prestar esmero al llenar el embudo, pues eso incide fuertemente en el resultado del ensayo). En él se hace percolar agua durante un lapso y se mide V_i . Durante el ensayo, los mecanismos de hinchamiento y dispersión, hacen que V_i disminuya, según el grado de dispersión de la muestra, en relación con la inestabilidad. Pero a veces, al comparar la V_i de un suelo virgen con la de otro degradado, se dan valores contradictorios. Para superar esa dificultad es recomendable calcular *EE* relacionando la velocidad final de infiltración (V_{if}) con la inicial (V_{i_0}) de modo que $EE = V_{if} / V_{i_0}$. O también, Inestabilidad Estructural: $IE = 100 (V_{i_0} - V_{if}) / V_i$.

Cualquiera sea la técnica empleada, los resultados obtenidos en suelos diferentes no son comparables sin un referente. Por eso, Orellana & Pilatti (1994) calculan *Er* (Estabilidad relativa) refiriendo la *EE* de un lote cultivado a la del mismo suelo sin cultivar, lo que permite cuantificar el deterioro del lote estudiado y comparar niveles de degradación de suelos diferentes, según la fórmula:

$$Er (\%) = 100 \times EE \text{ del suelo cultivado} / EE \text{ del mismo suelo en estado prístino.}$$

El cálculo de la *Er* media de una región, con datos procedentes de numerosos lotes con distinto manejo, permitió establecer una escala con tres niveles de degradación, limitados por valores críticos de *Er*, a saber: *Er* < 19 %: Suelos con estructura degradada; *Er* entre 19 y 54 %: Valores de transición;

$E_r > 54\%$: Deterioro admisible. Aunque esa escala carece de rigor por la variabilidad de los datos tratados, permite detectar tendencias degradantes de uso del suelo.

También es posible evaluar en laboratorio la resistencia a la degradación superficial. Para ello, Pilatti *et al* (2003) realizaron ensayos de Infiltración del sello, sometiendo camas de agregados a lluvia simulada. Hallaron grandes diferencias de infiltración (causada por el colapso de agregados) entre suelos del norte, centro y sur de Santa Fe con distinta intensidad de uso; también estimaron la influencia relativa de dos mecanismos de ruptura: golpeteo y estallido (Cuadro 6).

7.3. TENOR Y ESTADO DE AGREGACIÓN (TAG Y E°AG)

Como se explicó en ¶ 6.2.3, determinar la *Tag* implica separar de la muestra los *Mag* estables y los lábiles conjuntamente sin romperlos, y referir el peso seco de todos los *Mag* al total de la muestra. La mayor dificultad reside en separar los agregados unitarios de la muestra mediante un método idóneo, sencillo y no muy oneroso. Algunos autores efectúan un tamizado en seco, (Buschiazzo *et al.*, 1994) otros en alcohol (Tri, 1968). Este autor comparó diversas técnicas y halló los mejores resultados saturando las muestras previamente en alcohol de 95° y tamizándolas luego en el mismo líquido.

Además, Tri determinó el ESTADO DE AGREGACIÓN ($E^\circ ag$) - una granulometría de agregados - clasificados mediante una batería de tamices, según la siguiente escala (en mm): >3 ; 3 a 2; 2 a 0,5; 0,5 a 0,2; $<0,2$. Obsérvese que los resultados se aproximan a los pretendidos por el antiguo método *B* de análisis mecánico citado en ¶ 6.2.3. Aunque el método de Tri parece ser eficiente para conocer $E^\circ Ag$, carece de practicidad para su empleo como rutina. Por eso sería útil correlacionar la información que aporta con

otras propiedades y componentes edáficos en ecuaciones de edafotransferencia.

Aunque parezca obvio destacarlo, siempre es decisivo el modo de tomar muestras en el terreno. Orellana (1982) y Pilatti & Orellana (1987, 1994) lo trataron para distintos tipos de análisis y ensayos.

7.4. RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN (RP)

La introducción de un vástago metálico rígido en el suelo halla una resistencia 2 o más veces superior a la que puede encontrar una raíz de dimensiones similares. Ello se debe a la diferencia entre sus mecanismos de penetración y a causas ligadas a la fisiología de las raíces (Cerana, 1978). No obstante, es posible correlacionar ambos fenómenos y prever así el comportamiento de un sistema radical en un suelo dado.

Existen varios tipos de penetrómetros. Los hay de campo y de laboratorio. Éstos, a su vez, se dividen en: estáticos (aplican una fuerza creciente a un vástago apoyado sobre la muestra, hasta penetrarla) y dinámicos (el vástago se mueve a velocidad constante y presiona en forma creciente hasta penetrar). En ambos casos, lo que interesa es la presión que quiebra la resistencia (*RP*).

Orellana *et al.* (1995) presentaron un modelo estático sencillo cuyas características funcionales homologan sus mediciones a las de Whiteley *et al* (1981) que se relacionaban con impedancias reales de cultivos. Con ese modelo se midió *RP* en tres horizontes de un Argiudol ácuico (Fig. 19).

Esa figura relaciona *RP* (en ordenadas) con el contenido hídrico de dichos horizontes (θ , en abscisas): *RP* disminuye al crecer θ . Además, las curvas muestran la influencia de la textura y de la estructura, ya que esta última prevalece sobre aquella en el caso del horizonte *BA* estudiado.

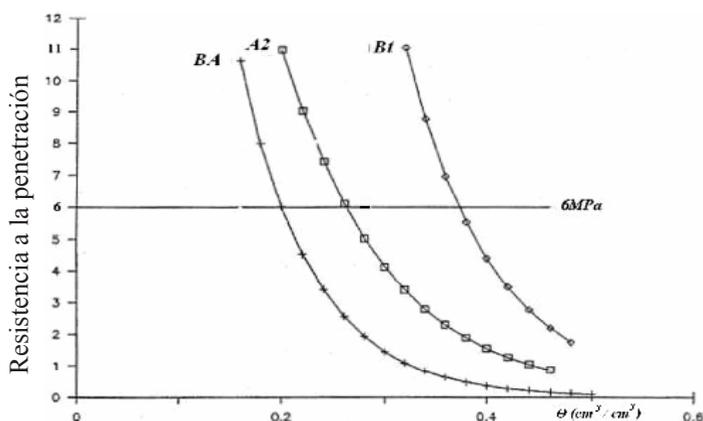


Fig. 19: RP en función del tenor hídrico en distintos horizontes (Orellana et al., 1995)

Los horizontes son: un A2 (segunda parte del A); franco limoso, masivo, situado bajo un Ap de igual textura pero con estructura granular); un BA (franco arcillo limoso, con estructura de bloques finos, friables) y un Bt (arcillo limoso, con fuerte estructura de prismas gruesos). Se observa que el Bt, a igual tenor hídrico, siempre presenta mayores valores de RP que los demás. En cambio, llama la atención que el BA sea más fácilmente penetrable que el A2; ello se debe a que su textura, más equilibrada, genera una estructura fragmentaria, con más poros que el A2, cuyo limo no logra ser agregado por la arcilla ni por el humus, de menor tenor que el Ap. La línea trazada a nivel de 6 MPa marca el límite crítico para la expansión radical, ya que 6 MPa del penetrómetro equivalen a 2 ó 3 MPa para raíces, según Whiteley et al., (1981) quienes estiman, que los penetrómetros dan lecturas 2 a 8 veces mayores que las raíces. Como según Pfeiffer (1893) la presión radical no supera 1,5 MPa, y tomando

arbitrariamente el factor 4, se tiene: 1,5 MPa x 4 = 6 MPa.

7.5. TENSIÓN DE TRACCIÓN (T) Y FUERZA DE ROTURA DE AGREGADOS (F)

Otra de las propiedades medibles, vinculada con la consistencia de los agregados, es la Fuerza de rotura (F) o Tensión de tracción de los agregados. Esta variable es útil para evaluar la resistencia mecánica a la ruptura por compresión, debida al pisoteo animal y al paso de maquinaria. Es aplicable a agregados superficiales de suelos desnudos y más secos que el límite superior de plasticidad., que se rompen (Fig. 20 cuando la carga (T) supera a las fuerzas de cohesión en el lugar de la falla. Para ello es muy utilizada una técnica que la determina a partir de la fuerza necesaria para romper un agregado individual entre 2 placas paralelas (Dexter, 1975, Braunack et al. 1979, Dexter & Kroes-bergen 1985), mediante la ecuación:

$$Y = c * F. d^{-2}$$

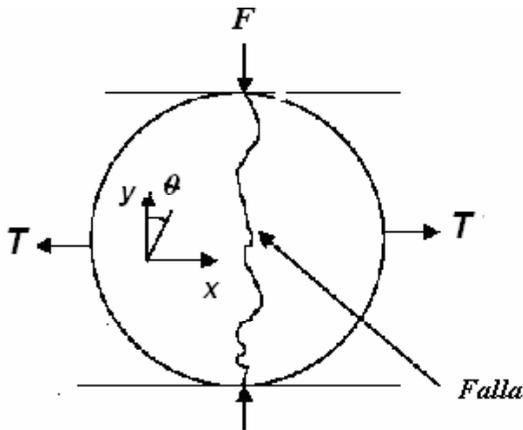


Fig. 20: Falla o rotura a la tracción por compresión diametral. «T» es la fuerza de tracción que se opone a la cohesión y, cuando la supera, provoca la rotura del agregado; F es la fuerza aplicada; θ es el ángulo formado entre el plano de fractura y el eje «y» (Munkholm, 2002)

Donde $Y = T$; F es la fuerza polar de ruptura; d = diámetro de la partícula esférica. El coeficiente c es una constante que depende de la relación entre el esfuerzo de compresión y el de tracción en el centro del agregado estudiado y en la práctica se considera igual a 0,576. (Dexter, 1975). Si el agregado fuera esférico, esa relación podría modelarse en función de 2 parámetros: el módulo de Poisson (desplazamiento horizontal / desplazamiento vertical) y el ángulo θ , entre el plano de fractura y el eje de compresión (Fig. 19). La determinación de Y mediante la ecuación (1) se basa sobre la hipótesis de agregados esféricos, tensión de rotura y razón estrés / esfuerzo similares (Módulo de Young) en ensayos de compresión indirecta., aunque los agregados naturales no sean perfectamente esféricos; pues Utomo & Dexter (1981) afirman que la tensión de rotura es su modalidad de rotura, aún por encima del límite plástico, cuando se rompen agregados individuales entre placas paralelas.

7.6. CASOS DE SUELOS SANTAFESINOS

En estos suelos, salvo los arenosos del albardón costero del Paraná y del extremo

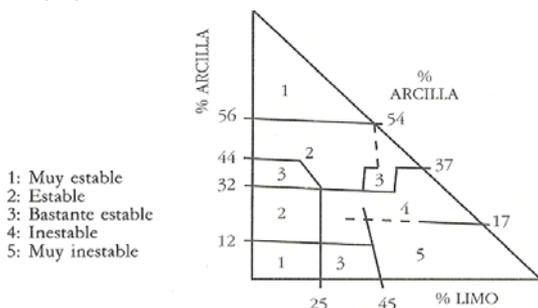
sudoeste, los horizontes A tienen la composición indicada en ¶ 5.2, a). El alto tenor de limos y arenas fina y muy fina los torna sensibles a la degradación en cuanto disminuya el contenido de materia orgánica por debajo de su nivel crítico, lo que sucede cuando se los cultiva con labranzas convencionales. Además, esa similitud textural, que excede los límites provinciales y abarca gran parte de la región pampeana, (Pecorari *et al.*, 1990) permite generalizar su tendencia a degradarse. De allí que el Cuadro 7 muestre respuestas parecidas -a manejos degradantes- en suelos de toda la Provincia.

En cada lugar, los lotes fueron muestreados simultáneamente. Se observa la brusca degradación de la estructura comparando, en la columna Er, el estado prístino con el hallado en lotes vecinos, con más años de uso o diferente manejo. Los porcentajes de carbono orgánico guardan cierto paralelismo con la estabilidad de agregados, ratificando la fundamental importancia de ese componente para el estado físico del suelo. Todos los estudios realizados, en numerosos lugares de la Provincia, dieron resultados compatibles con lo expuesto a modo de ejemplo en el Cuadro 7.

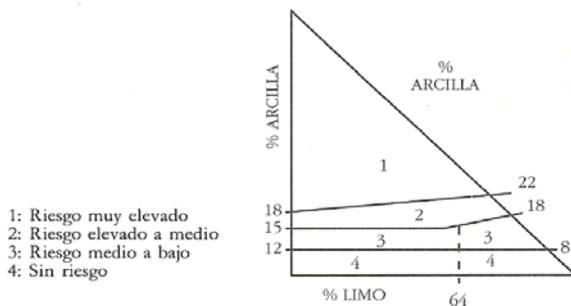
Cuadro 7: Estabilidad de agregados de suelos santafesinos según intensidad de uso (*)

LOCALIDAD	USO	C.O. %	EE (%)	ER
Reconquista	Bajo alambrado	1,7	42	100
	13 años de agricultura	1,3	12	29
	15 años de agricultura (maíz/algodón)	1,0	11	26
	30 años de agricultura	0,7	5	12
Margarita	Monte virgen	1,9	75	100
	Desmonte, 2 años después	1,4	49	65
	Ídem, 10 años después	1,2	11	23
	Bajo alambrado	1,7	73	100
Humboldt	Agricultura + 3 años de pastura de gramíneas	1,5	33	45
	10 años de agricultura	1,2	11	15
	18 años de agricultura	1,1	7	10
Godeken	Bajo alambrado	2,2	55	100
	Rotación: 4 años pradera / 4 años agríc., saliendo de pradera	1,7	43	78
	15 años agricultura convencional + 7 a.ños cincel	1,4	29	53
	Rotación: 4 años pradera / 4 años agríc., saliendo de agríc.	1,2	22	40

(*) Fuentes: Orellana et al. (1988b); Orellana & Pilatti, 1994. Referencias: C.O.: Carbono Orgánico; EE: Estabilidad de agregados; ER: Estabilidad relativa.



A. Estabilidad estructural del horizonte A_p en relación con sus contenidos de limo y arcilla.



B. Riesgo de asfixia radicular producida por el horizonte A_p en relación con sus contenidos en limo y arcilla.

Fig. 21. Girard (1970; 1983) La textura ejerce importante influencia sobre las propiedades edáficas. Tenores de limo similares al los de muchos suelos pampeanos caen en las clases 4 y 5 (A), y mantienen su agregación mientras están bien dotados de Mat. orgánica (CO ? 1,7%, según Orellana & Pilatti, 1994). Lo mismo sucede con el peligro de anegamiento por lluvia (Clase 1, en B). De allí la importancia de lograr y mantener un buen estado estructural.

la granulometría con la *EE* (Fig. 21A) y con el riesgo de anaerobiosis (Fig. 21B). Se observa que tenores de limo similares a los de horizontes A de la Región Pampeana concuerdan con una baja *EE*. Cabe destacar que esas gráficas no incluyen a la Mat. orgánica, cuya presencia eleva notablemente la *EE*.

8. REGENERACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Éste es un aspecto esencial en la recuperación de suelos degradados. La mayoría de los estudios sobre el tema se centró en horizontes superficiales, ya sea porque los más profundos mantienen su estatus o porque su modificación es más difícil y onerosa. Se distinguen 2 escenarios diferentes.

* Casos de erosión, en los cuales hay pérdida irreversible de material edáfico. Esta es una situación extrema y replantea incluso el uso del suelo, adaptándolo a las posibilidades del lugar. A veces hay que recomenzar el proceso evolutivo del suelo en cuestión.

* No habiendo erosión, se presume que un suelo está degradado cuando merman los rendimientos sin razón aparente (clima, plagas u otra causa visible). Las posibilidades de recuperación dependen aquí de la resiliencia del suelo en cuestión.

8.1. RESILIENCIA EDÁFICA

Si tensamos un elástico y lo soltamos, vuelve a su formato original siempre que ninguna de las fibras que lo componen se haya dañado o roto. El fenómeno es conocido como resiliencia. Por analogía, resiliencia (del latín *resilio*: volver atrás) es la propiedad o aptitud de un sistema para recuperarse después de ser modificado (automejoramiento). Originariamente ese término fue utilizado en ingenierías y hoy está incorporado a otras ciencias, incluyendo a las sociales. En Ecología se refiere a la recuperación de

ecosistemas y subsistemas (como el suelo) alterados.

La capacidad de recuperación de un suelo -incluyendo la de su estructura- sólo es posible siempre que el uso no haya modificado en exceso alguna variable crítica durante un lapso prolongado (caso de la erosión). Al exceder umbrales críticos, los procesos vitales se dañan y pierden su capacidad de resiliencia. Por eso urge detener la degradación antes que sea irreversible. Además, el proceso de recuperación es más lento que el de degradación.

8.2. LOS CAMINOS DE LA RECUPERACIÓN

El ítem 3.3 mostró cómo se unen las partículas, formando agregados. Para que eso suceda deben cumplirse necesariamente -previa eliminación de las causas de la degradación- los siguientes requisitos: a) Asegurar la presencia de los componentes indispensables (humus, arcilla, oxihidróxidos, agua, ciertos cationes) en cantidad y proporción suficientes; b) Crear condiciones ambientales favorables: *pH*, ciclos de humectación y secado, manejo cuidadoso, etc. c) Fomentar la actividad biológica; d) (Opcional) Adicionar sustancias adhesivas.

8.3. REGENERACIÓN O MODIFICACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Para algunos, bastaría 15 % de arcilla para generar *UEs* mediante procesos físicos y biológicos. Pero esa tesis no puede ser extrapolada, pues la facultad de formar agregados no depende sólo de la cantidad arcilla, sino también de su calidad, del tenor de humus, de la presencia de oxihidróxidos, de los tenores de limo y arena, y de las características físicas y químicas del medio (ciclos térmicos y de humedad, *pH*, composición del complejo de intercambio, solutos, etc.) Pecorari *et al.* (1990) juzgan insuficiente el

tenor de arcilla de los suelos pampeanos - predominantemente íltica (Stephan *et al.*, 1977)- para agregar su alto contenido de limo y arenas finas (50 a 75 %) y existen ensayos que avalan ese concepto (Orellana, 1988b).

Para corregir la textura superficial, cuando debajo hay un horizonte arcilloso, diversos autores recurrieron a la mezcla de horizontes. Ensayos realizados con material de un *Argiudol* del centro santafesino mostraron que, para lograr una agregación adecuada, se requeriría más de 30 % de arcilla (Orellana, 1988b), mientras en esa región el horizonte A sólo contiene entre 15 y 22 %.

8.3.1. Componentes indispensables: El horizonte A de los suelos pampeanos es, en general, franco limoso. En Santa Fe tiene de 18 a 22 % de arcillas ílticas, 60 a 70 % de limo y 5 a 10 % de arena, casi toda fina y muy fina. Cuando virgen, posee 1,6 a 1,7 % de carbono y su *pH* es de 6,5 a 6,7. Sin calcáreo, sus bases de cambio son, aproximadamente: calcio (50 %), magnesio (13 %), potasio (7 %), sodio (1 %), y 30 % su acidez de cambio.

Tras medio siglo de cultivo, la acidez de cambio descendió al 50 %, el *pH* está entre 5 y 6, la materia orgánica bajó un 30 % y la estructura pasó de "granular fuerte" a masiva, con algunos agregados débiles (Cuadro 4).

Como la textura no varió en ese lapso, la degradación debe vincularse con el principal coloide reducido: el humus. Orellana (1988b) ensayó en laboratorio el comportamiento de muestras con distintos tenores de arcilla y, tras 20 ciclos de humectación-seca, halló que la cantidad de arcilla era insuficiente para agregar el alto tenor de limo presente. En cambio, la agregación fue notoria a partir de 30 % de arcilla. Considerando que el contenido orgánico de las muestras ensayadas era bajo (0,6 a 1,5 %), que el ensayo careció de la actividad biológica propia del medio natural y que un suelo como ese, con

igual textura y más humus se halla bien estructurado (Cuadro 4, serie Esperanza), se concluyó que la principal causa de degradación residía en la disminución del tenor de humus.

Aunque la materia orgánica en general es más o menos lábil y la arcilla persistente, el humus posee (según su composición) 2 a 4 veces más poder de agregación que la arcilla, es más fácil de obtener e incorporar. No sucede lo mismo con la arcilla, cuya adición al horizonte superficial no siempre es factible, en especial cuando no abunda en el lugar o se halla acumulada a cierta profundidad.

Luego, el aporte de materia orgánica al suelo es recomendable. Además de su efecto adhesivo, intensifica la actividad biológica, que genera agregados granulares ¿Hasta cuándo conviene adicionarla? Hay una tendencia natural al equilibrio, según cada clima -entre acumulación y biodegradación de la materia orgánica- resultando antieconómico enriquecer el suelo por encima del punto de equilibrio, cuyo valor debería aproximarse al de un suelo virgen del lugar. En el caso del centro de Santa Fe, un 3 % de materia orgánica con relación C/N ≈ 10 (1,57 % de carbono orgánico)

El aporte de materia orgánica puede efectuarse mediante la incorporación de rastrojos y estiércol (Ej.: deyecciones de los vacunos que se excretan directamente en los lotes: nocheros, o se obtienen de corrales de encierro y se aplican al campo), efluentes cloacales tratados y otros residuos orgánicos.

8.3.2.- Condiciones ambientales: Las condiciones que impone el clima pampeano son, en general, favorables para la vida vegetal y animal, aunque con irregularidad (en especial la pluvial). Si bien la alternancia de ascensos y descensos térmicos e hídricos en el suelo favorece la biodiversidad, conviene evitar cambios extremos, manteniendo

un microclima moderador mediante una apropiada cubierta vegetal. Ésta conserva el agua -que llega en forma intermitente en cada lluvia- al atenuar la evaporación directa. Si esto no bastara, cabría incorporar riego suplementario, siempre que la calidad del agua disponible lo permitiera (Marano *et al.*, 2000).

Otro factor a considerar, para favorecer la actividad biológica interna del suelo, es su composición química, parte de la cual se expresa a través del *pH*, ligado a la composición del complejo de intercambio. Éste debe poseer poco sodio y, para que el *pH* se acerque a la neutralidad, en estos suelos debería tener un 70 u 80 % de calcio. Un *pH* de tal calidad genera humus favorable para la agregación.

Logrado ese ambiente edáfico, es deseable elevar el tenor de humus mediante el aporte de materia orgánica y luego ejercer un manejo cuidadoso para sostener un contenido equilibrado. Ese manejo debe contemplar un balance equilibrado entre aptitud productiva del suelo, demandas del mercado, infraestructura del predio, cuestiones logísticas y empresariales, etc. La opción debe tender a mantener el estado estructural en condiciones óptimas.

8.3.3. Fomento de la actividad biológica: Esto implica alentar su proliferación -según lo expresado en a) y b), manteniendo la biodiversidad. Es recomendable evitar el monocultivo, el exceso de labranzas (Pilatti *et al* 1988), el aporte de biocidas al suelo e incluir en la rotación plantas con sistemas radicales que favorezcan la agregación (Pilatti *et al.*, 1987).

La probada acción positiva de las lombrices es un recurso aún no bien explotado. Para ello existen 2 caminos: el incremento de la población autóctona y la introducción de especies alóctonas.

Ljungström *et al* (1973) identificaron los oligoquetos existentes en Santa Fe y los sue-

los en los cuales se los halló. Las especies dominantes (*Allobophora trapezoides*, *Eukerria eiseniana*, *Pheretima californica*) no mejoran sustancialmente la estructura por razones específicas de esas especies, cabiendo contemplar la introducción de especies mejoradoras. Aunque Clapperton & Lee (1998) no aconsejan la introducción de nuevas especies en Canadá por falta de conocimiento científico sobre la ecología de las no menos de 25 especies locales, Bouché (1972) alienta a introducir alguna especie, habida cuenta que las lombrices no migran (hay pruebas geológicas de eso) y que son tan sensibles a los agroquímicos que en caso de resultar perjudiciales se las puede exterminar fácilmente. Por ejemplo, *Lumbricus terrestris* es capaz de llevar a la superficie arcilla de horizontes profundos, lo cual mejoraría la agregación de horizontes limosos, de modo que, si fuera factible, la introducción de *L. terrestris* u otra especie de actividad similar, podría ser beneficiosa. En tal caso se debe contemplar el ambiente edáfico local y equipararlo con el de origen de la especie a introducir.

En tanto, una medida al alcance del productor es incluir cultivos plurianuales en la rotación. Clapperton & Lee (1998) aseguran que cultivando oleaginosas (particularmente lino y canola) y leguminosas en siembra directa aumentaría la población y el tamaño de las lombrices.

8.3.4. Adición de adhesivos y aglomerantes: Para que los coloides formen agregados, la composición iónica debe favorecer su floculación. Pero por sí sola, es insuficiente: "granulación es floculación y algo más" (Bradfield, 1936). En efecto, la floculación aglomera a las partículas, pero algo debe mantenerlas unidas de ahí en más: cationes polivalentes, carbonato de calcio, hidróxidos de hierro, productos de la activi-

dad biótica (raíces, hifas de hongos, polisacáridos, ácidos poliurónicos, complejos órgano-minerales, aluminosilicatos, etc. asociados al accionar e la biota edáfica, en especial: lombrices, hongos y bacterias. (Fig. 6) En suma: para revertir la degradación física habría que llevar al óptimo el contenido orgánico (incorporando materiales como rastrojos, abonos verdes, residuos industriales aptos, barros depurados de efluentes cloacales, etc.).

Para mantener un hábitat propicio conviene adecuar el *pH* corrigiendo el complejo de intercambio con CO_3Ca . (Carbonato de calcio) u otra enmienda de efectos similares; luego aplicar un manejo conservacionista, incluyendo en la rotación cultivos cuyas raíces favorezcan la agregación (Pilatti *et al.*, 1987, Orellana *et al.* (1988b) y reducir al mínimo las labranzas. El encalado con CO_3Ca finamente molido (debe pasar por tamiz de $50 \mu m$) introduce calcio en el complejo de intercambio y eleva el *pH* actuando como fijador de los flóculos. También cabe aplicar dolomita o yeso. Éste -en dosis bajas- es de uso frecuente en el norte pampeano; después de aplicarlo se ha observado menor resistencia mecánica subsuperficial durante un tiempo. El yeso aporta azufre, a menudo deficiente en la región, pero es recomendable controlar el *pH* del suelo, que en general ya es ácido, porque el yeso también lo es. Si disminuyera demasiado, habría que neutralizar con CO_3Ca .

El aporte de aglomerantes sintéticos es conocido, pero no utilizada en el país. Algunos de ellos son:

- VAMA (del nombre en inglés: Vinil-Acetato, Maleico Anhídrido), polímero de acetato de vinilo y anhídrido maleico que se usa mezclado con hidróxido de calcio;

- HPAN (Hidrolizado de PoliAcriloNitrilo) cuyo nombre comercial es “Krilium”; Es el más usado, pero muy caro. Su uso

está restringido a suelos con cultivos de alta rentabilidad.

- PVA (Alcohol PoliVinílico) componente de pinturas “al latex”, cola para madera, etc.

Si bien estos productos favorecen la agregación, sus efectos son variados y a veces contradictorios, según la composición de cada suelo. En general son caros y su aplicación debe repetirse tras cada remoción, que rompe irreversiblemente esas uniones entre partículas. Algunos se aplican como aerosoles, en bajas dosis, pero impermeabilizan los agregados, dificultando el ingreso de agua al perfil.

9. ¿EXISTE UNA “ESTRUCTURA IDEAL”?

Siendo la estructura edáfica la configuración física conjunta de las fases sólida y fluida de un suelo (§2.1) y como aquí nos referimos a suelos cultivados, cabe al fin definir qué “calidad de estructura” es propicia para el normal crecimiento y desarrollo de los cultivos.

No es posible definir una “estructura ideal” válida para todos los escenarios clima-planta-suelo. Sin embargo, contemplando las exigencias ambientales comunes a la mayoría de los cultivos habituales en el Norte de la Región Pampeana, en una llanura con pendientes inferiores al 1%, es posible delinear -a grandes rasgos- un concepto de estructura idónea que podrá luego ajustarse según la especie y variedad cultivada.

Para ello adoptamos las variables físicas pertinentes del SUELO IDEAL, sugeridas y evaluadas por Orellana & Pilatti (1999), Pilatti & Orellana (2000) y Pilatti *et al.* (2003). La propuesta de un SUELO IDEAL abarca las propiedades citadas en el Cuadro 8 y otras, también ligadas a las funciones que el suelo debe cumplir para satisfacer necesidades de las plantas cultivadas.

Cuadro 8. Caracterización de una estructura edáfica ideal (*)

Para...	Mediciones sugeridas	Límites críticos propuestos
a) Brindar un adecuado espesor útil	Profundidad enraizable Densidad del suelo Resistencia mecánica a la penetración (¶7.4) Intervalo hídrico óptimo (IHO) (¶4.4)	60 a 150 cm. Variable según cultivo. 1,35 a 1,42 según contenido de arcilla 6 MPa (penetrómetro), 2MPa (raíces) 0,11 cm ³ /cm ³
b) Permitir aeración suficiente	Macroporos, en especial bioporos. (¶4.2) Sello superficial (potencial) (¶3.5)	0,15 cm ³ /cm ³ 2 cm ³ /h post 20 ^{min} ; encharcamiento post 10 ^{min}
c) Amortiguar intermitencia e irregularidad del contenido de agua útil para los cultivos	Intervalo hídrico óptimo (IHO) (¶4.4) Tasa de infiltración (¶6.2.4) Cobertura vegetal (viva y muerta) Capacidad de almacenamiento de agua Lámina de agua fácilmente utilizable	0,11cm ³ /cm ³ 2 cm/h 40 % > 90 mm en el espesor enraizable. Varía según cultivo y demanda atmosférica.
Idem a), b), c)	Costra superficial y emergencia (¶6.3.1)	6 MPa (penetrómetro), 2 MPa (raíces)
d) Resistir la degradación física	Estabilidad de agregados (Ea; Et) (¶6.2)	Er = 0,54.(Orellana & Pilatti, 1993;1994)

(*) Fuente: Pilatti et al, 2003(Modificado); Capítulo que trata el tema. Para los demás, ver bibliografía citada.

La columna “Para...” del Cuadro 8 describe las funciones edáficas respecto de los cultivos; “Mediciones sugeridas” enumera medidas que las evalúan y finalmente se dan sus valores críticos, a los cuales conviene acercarse para establecer una óptima relación suelo-planta.

Un suelo que reúna los requisitos citados, con unidades estructurales penetrables por raíces y cuya intraporosidad (¶4.2) sea capaz de retener agua, garantizar la respiración radical y el flujo hídrico preferencial, será hábitat adecuado para las raíces y la mesofauna edáfica. Esas propiedades lo aproximan a un estado ideal, deseable para el normal desarrollo de los cultivos.

10. CONCLUSIÓN

El enfoque del tema estructura, según aquí se trata, refleja la experiencia del autor y su equipo tras más de 40 años de reconocimientos e investigaciones en suelos santafesinos, en pos de resolver problemas agronómicos

de origen edáfico. Eso implicó investigar sus causas y elaborar nuevos conceptos (IHO, Suelo Ideal, modelos de cultivos, etc.) visibles en las citas bibliográficas

El tratamiento de los temas elegidos no es de ningún modo exhaustivo. Algunos tópicos merecieron capítulos o párrafos más extensos porque existe abundante información sobre ellos. Otros, en cambio, fueron incluidos para difundir su conocimiento y probable adopción, ya que son de uso escaso en la región pampeana.

Para un empleo útil de las variables edáficas expuestas, conviene primero identificar qué problemas presenta cada suelo y en qué medida afectan a los cultivos. Una vez conocidos y jerarquizados, cabe determinar qué variables los caracterizan y adoptar las técnicas que mejor expresen su magnitud.

Como se vio, la estructura edáfica no es un tema aislado. Aunque fundamental, ya que afecta a la respiración, nutrición y otras funciones vitales de las plantas, debe ser considerado en relación con las demás variables del sistema planta-clima-suelo.

11.- BIBLIOGRAFÍA

- ABU-SHARAR, T. M.; BINGHAM, F. T. & RHOADES, J. D.** 1987a Stability of soil aggregates as affected by electro-lyte concentration and composition. S.S.S.A. Journal 51(2):309-314.
- ABU-SHARAR, T. M.; BINGHAM, F. T. & RHOADES, J. D.** 1987b. Reduction in hydraulic conductivity in relation to clay dispersion and disaggregation. S.S.S.A. Journal 51(2):342-346
- AMÉZQUETA, E.** 1999. Soil agrégate stability: A review. J. Sustainable Agriculture 14(2-3):83-151.
- ANDRIULO, A.; J. GALANTINI; C. PECORARI & E. TORIONI.** 1991. Materia orgánica del suelo en la región pampeana argentina. I. Un método de fraccionamiento por tamizado. INTA, EEA Pergamino. Inf. Técnico 250, 18 p.
- ARKIN, G. F. & TAYLOR, H. M.** 1981. Modifying the root environment to reduce crop stress. ASAE, Michigan. 408 pp.
- BACHELIER, G.** 1963. La vie animale dans les sols. ORSTOM, Paris, 279 pp.
- BACHELIER, G.** 1978. La faune des sols: son écologie et son action. ORSTOM, Paris, 450 pp.
- BAVER, L. D.; W. H. GARDNER & W. R. GARDNER.** 1973. Física de suelos. UTEHA, México, 529 pp.
- BOWEN, H. D.** 1981. Alleviating mechanical impedance. En: Arkin & Taylor, Op.cit.
- BRADFIELD, R.** 1936. The value and limitation of calcium in soil structure. Am. Soil Assoc. Bull. XVII:31-32
- BRADFORD, J. M.** 1986. Penetrability. In: A.Klute (Op. Cit) Part I: Physical and mineralogical methods: 463-477.
- BRANDINELLI DE SARDI, M. E.; A. J. LEGASA; C.A.PURICELLI & E. WEIR.** 1978. Propiedades físicas de un suelo serie Marcos Juárez bajo condiciones extremas de manejo. 8ª Reunión Arg. De la C. del Suelo. Bs. Aires. 14 pp.
- BRAUNACK, M. V.; HEWITT, J. S. & DEXTER, A.R.** 1979. Brittle fracture of soil aggregates and the compaction of aggregate beds. J. Soil Science 30, 653-667.
- BOUCHÉ, M.** 1972. Lombriciens de France. Ecologie et Systématique, INRA, Paris (1972) 672 pp
- BUCKMAN, H. O & N. C. BRADY.** 1966. Naturaleza y propiedades de los suelos. UTEHA, Barcelona, 590 pp.
- BUSCHIAZZO, D. E.; S. B. AIMAR; F. J. BABINEC & L. FERRAMOLA.** 1994. Un método para la determinación de estabilidad de agregados en seco en suelos de la región semiárida pampeana central (Argentina) C. del Suelo 12(2):32-34.
- CERANA, L.A.** 1959. Estudio experimental sobre el porcentaje de marchitamiento permanente. Clasificación de los suelos salinos. Santa Fe, Ministerio de Agricultura. y Ganadería., D. G. de Suelos y Química Agrícola. 73 pp.
- CERANA, L.A.** 1978. La resistencia mecánica del suelo y el crecimiento de los tallos subterráneos y raíces. Univ. Católica de Santa Fe; Fac. de Edafología. 61 pp.
- CLAPPERTON, M. J. & LEE, N.O.** 1998. Farming for Earthworms, AAFC, Lethbridge Res. Centre, Lethbridge., Canadá.
- COBERTERA, E.** 1993. Edafología aplicada. Suelos, producción agraria, planificación territorial e impactos ambientales. Ed. Cátedra Geografía Menor. 326 pp.
- CONSTANTINO, R.** 2005. Una planta de compostaje convierte lodos cloacales en fertilizantes. AUNO (Agencia Univ. Noticias y Opinión) Univ. Nac. Lomas de Zamora. <http://www.auno.org.ar/leer.php/1969>.
- DE BATTISTA, J. J.; A. ANDRIULO & C. PECORARI.** 1993. El Perfil Cultural: un método para la evaluación de sistemas de cultivo. Ciencia del Suelo 10-11:89-93

- DE LEEHNEER, L. & M. DE BOODT.** 1958. Determination of aggregate stability by the change of the mean weight diameter Proc. Intern. Symposium on soil structure. Ghent:290-300
- DEMOLON, A.** 1960. *Dynamique du sol.* Dunod, Paris. 520 pp.
- DEXTER, A.R.** 1975. Uniaxial compression of ideal brittle tilths. *Journal of Terramechanics* 12: 3-14.
- DEXTER, A.R.** 1978. A stochastic model for the growth of root in tilled soils. *J.f Soil Science*, 29 (1): 102-116.
- DEXTER, A.R. & B. KROESBERGEN.** 1985. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. *J. Agric. Eng. Res.* 31:139-147.
- DEXTER, A. R. & C. W. WATTS.** 2000. Tensile strength and friability. In Smith & Mullins, Op. Cit.:401-430
- DUCHAUFOR, P.H.** 1960. *Précis de Pédologie.* Masson & Cie. Éd. 438 pp.
- DUCHAUFOR, P.H.** 1987. *Précis de Pédologie (Resumen)* En: Llorente Isidro, Op. Cit.
- EAVIS, B. W; RATCLIFF, L. E. & TAYLOR, H. M.** 1969. Use of dead load technique to determine axial root growth pressure. *Agronomy.Journal*, 61: 640-643.
- ELLIOTT, E.T. & D. C. COLEMAN.** 1988. Let the soil work for us. *Ecol. Bull.* 39, 23-32.
- EMERSON, W. W.** 1959. The structure of soil crumbs. *J.Soil Science* 10:235-244.
- EMERSON, W. W.** 1967. A classification of soil aggregates based on their coherence in water. *Australian Journal of Soil Research* 5: 47-57.
- EMERSON, W. W.** 1977. Physical properties and structure. En: *Soil factors in crop production in a semi-arid environment* (J. S. Russell & E. L. Greacen, Eds.):78-104. Queensland University Press.
- FAO.** 2007. Evaluación de la tierra. Hacia un ámbito revisado. Discusión sobre la Tierra y el Agua. Documento N° 6 del Departamento de Ordenación de Recursos Naturales y Medio Ambiente.
- GAUCHER, G.** 1971. *Tratado de pedología agrícola.* El suelo y sus características agronómicas. Omega, Madrid. 398 pp.
- GIRARD, M. C.** 1970. Étude statistique des notions de type et de phase sur un sol méditerranéen. *Cabiers OR-STOM.* VII (3): 348-375.
- GIRARD, M. C.** 1983. Recherche d'une modélisation en vue d'une représentation spatiale de la couverture pédo-logique. Application à une région des plateaux jurassiques de Bourgogne, Thèse. INA, Paris.
- GOLLÁN, J. & D. LACHAGA.** 1939. Algunos suelos típicos de Santa Fe. Santa Fe, Min. Salud Públ. y Trabajo, Inst. Experim.de Invest. y Fomento Agrícola-Ganadero. Dep. Quím. Agrícola y Edafología. Publ. Técn. N°16. 39 pp.
- GONZÁLEZ CARCEDO, S.** 2007. Textura, estructura y agregación de suelos. 1. Revisión de conceptos. 2ª. Las estructuras texturales. 2b) Las estructuras agregacionales. En: Ibáñez, 2007 Op. Cit:
- GREEN, W. H. & G.A. AMPT.** 1911. The flux of air and water through soils. *J. Agric. Sci.* 4: 1-24.
- HAMBLIN, A. P.** 1985. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. *Advances in Agronomy* 38:95-157.
- HARRIS, R. F. G, CHESTER, G. & ALLEN, O. N.** 1966. Dynamics of soil aggregation. *Adv. Agron.* 18:107-169.
- HÉNIN, S.** 1948. Essai d'une théorie de la stabilité structurale des sols. *Plant and Soils* I (2):167-178.
- HÉNIN, S.** 1976. Cours de physique du sol. I: texture - structure - aération. Editest, ORSTOM, Paris. 159 pp.
- HÉNIN S., R. GRAS & G. MONNIER.** 1972. El perfil cultural. Mundi Pensa, Madrid, 342 pp.
- HÉNIN, S., G. MONNIER & A. COMBEAU.** 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité

- structurale des sols. *Ann. Agron.* 9:71-90
- HÉNIN, S. & L. TURC.** 1949. Essai de fractionnement des matières organiques du sol. *C.R..Acad. Agric.*35:41-43.
- HOFMAN, G.** 1975. Les variations de l'instabilité des agrégats avec la profondeur dans la couche arable et ses causes. *Pédologie* XXV(1):56-6.7
- IBÁÑEZ, J. J.** 2007. Un Universo invisible bajo nuestros pies. Los suelos y la vida. Weblogs madrimasd.org/universo.
- IMHOFF, S.** 2002. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 66:1656-1661.
- JACKSON, M.L.** 1982. *Análisis químico de suelos.* 4a. edición. Edit. Omega, Barcelona. 663 p.
- KAY, B. D. & D. A. ANGERS.** 2000. Soil structure. En: Sumner, M. E, 2000, Op. Cit.
- KUBIENA.** 1938. *Micropedology.* Collegiate press. Ames, Iowa. U.S.A.
- LAL, R.** 1991. Soil Structure and Sustainability. *J. Sustainable Agriculture* 1 (4):67-91.
- LAL, R.** 1993. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability. *Soil & Tillage Res.* 27:1-8.
- LAL, R. & SHUKLA, M. J.** 2004. *Principles of Soil Physics.* Marcel Dekker, Inc. N. York. 716 pp.
- LE BISSONNAYS, Y.** 1996. Agrégate stability and assessment of soil crustability, and erodibility. I. Théorie and methodology. *Europ. J. of Soil Sci.* 47:425-437.
- LETEY, J.** 1985. The study of soil structure: ¿Science or art? *Austr. J. Soil Res.*29:697-707.
- LEY, G. C.; C. E. MULLINS & R. LAL.** 1993. Effects of soil properties on the strength of weakly structured tropical soils. *Soil Hill. Res.* 28:1-13
- LJUNGTRÖM, P-O; J.A. DE ORELLANA & L. J. J. PRIANO.** 1973. "Influence of edaphic factors on earthworms distribution in Santa Fe Province, Argentina". *Pedobiologia* 13 (3): 236-247.
- LLORENTE ISIDRO, M.** 2002. Formaciones superficiales. En *Geología 2002.* Universidad de Salamanca.
- MANICHON, H.** 1987. Observation morphologique de l'état structural et mise en évidence d'effets de compactage des horizons travaillés. En Monnier et Goss, 1987, op. cit.
- MARANO, R. P.; M. Á. PILATTI & J. A. DE ORELLANA.** 2000. Aguas subterráneas del centro de Santa Fe para riego suplementario. Estudio del efecto de la calidad del agua sobre propiedades del suelo mediante simulación física. En Tineo, A., Ed. "Hidrología Subterránea"(ISSN 1514-4186) Serie de correlación geológica (13):89-98.
- MONNIER, G.** 1965. Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. *Ann. Agron.* 16:471-534.
- MONNIER, G. & M. J. GOSS.** 1987. Soil Compaction and Regeneration. Proceedings of the Workshop on Soil Compaction. Avignon, September 1985. A. A. Balkena, Editor. 167 p.
- MONNIER, G.; P. STENGEL & J. C. FIES.** 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Ann. Agron.* 24(5): 533-545.
- MONNIER, G.; L. TURC & C. JEANSON-LUSIGNAN.** 1962. Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. Agron.* 13(1):55-63.
- MUNKHOLM, L. J.** 2002. Soil Fragmentation and Friability.Effects of Soil Water and Soil Management. Danish Inst.Agricultural Sciences, Foulum. The Royal Veterinary & Agricultural University, Copenhagen. Ph.D. Thesis
- MURPHY, P.W.(Ed.)** 1962. Progress in soil zoology: Papers from a Colloquium on Research Methods. *Soil Zoology Comm. of the ISSS,* Rothamsted Experimental Station,

- Hertfordshire, July, 1958. Butterworths, London
- NACCI, S. & I. PLA SENTIS.** 1989. Técnicas y equipos desarrollados en el país para evaluar propiedades físicas del suelo. Fondo Nac. de Inv. Agr. Venezuela. 67 pp.
- NEUFERT, E.** 1979. Arte de proyectar en arquitectura. Ed. Gustavo Gili S. A. Barcelona. 12ª Ed. 447 pp.
- NORERO, A.** 1975. Lecciones de Física de Suelos. Curso postgrado suelos y riego. CIDIAT, Mérida (Ven.) 266 pp.
- NORERO, A.** 1980. Concepto dinámico de "humedad disponible" y su estimación para fines técnicos. CIDIAT, Venezuela. 26 pp.
- OADES, J. M.** 1984. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant & Soil* 76, 319-337.
- ODUM, E. P.** 1971. Ecología. Nueva Editorial Interamericana. 639 pp.
- ORELLANA, J. A. de.** 1982. El estado físico del suelo. *CYTA* (28), 4-7.
- ORELLANA, J. A. de.** 1988a. El tercer "rol" del suelo. *Bol. Inf. Técn. FAVE* N°1:1-5.
- ORELLANA, J. A. de.** 1988b. Mezcla de horizontes: composición granulométrica y estructura. *FAVE* 4(1-2):70-79.
- ORELLANA, J. A. de.** 1989. Expansibilidad y penetrabilidad de un horizonte B2t con enmiendas cálcicas. *C. del Suelo* 7(1-2):107-111.
- ORELLANA, J. A. de.** 1990. "Impedimentos mecánicos al desarrollo vegetal: costras, pisos de arado y horizontes texturales". *FAVE* 4 (1-2): 1-16.
- ORELLANA, J. A. de; D. GRENÓN & O. QUAINO.** 1995. Un penetrometro de escala milimétrica: calibración y uso. *FAVE* 9(2):19-25
- ORELLANA, J. A. de & M. Á. PILATTI.** 1990. Aplicación de enmiendas cálcicas en un horizonte B2t. *C. del Suelo* 8 (2):127-139
- ORELLANA, J. de & M. Á. PILATTI.** 1994. La estabilidad de agregados como indicador edáfico" *C. Suelo* 12:75-80
- ORELLANA, J. A. de & M. A. PILATTI.** 1999. The Ideal Soil: I. An Edaphic Paradigm for Sustainable Agricultura. *J. Sustainable Agriculture* 15(1):47-59.
- ORELLANA, J. A. de; M. Á. PILATTI & D. A. GRENÓN.** 1997. Soil Quality: An Approach to Physical State Assessment. *J. of Sustainable Agriculture* 9(2-3):91-108
- ORELLANA, J. A. de; M. Á. PILATTI & L. J. J. PRIANO.** 1988a. Estabilidad de agregados edáficos en el Dep. Las Colonias. *FAVE* 3(1-2)71-79.
- ORELLANA, J. A. de; M. Á. PILATTI & L. J. J. PRIANO.** 1988b, 1988 Estabilidad de agregados edáficos en el Dep. Las Colonias (Santa Fe) *FAVE* 4(1-2)71-79.
- ORELLANA, J. A. de; L. J. J. PRIANO & M. Á. PILATTI.** 1988b. Niveles de pH y de nutrimentos en Argiudoles de Las Colonias, Santa Fe. *FAVE* 3(1-2):51-57.
- PAGE, J. B.** 1955. Role of physical properties of clays in Soil Science. *Calif. Dep. Nat. Resources Bull. N° 169*:167-176.
- PAPADAKIS, J.** 1954. Ecología de los cultivos. I. Ecología general. Min. Agr. Gan. Buenos Aires: 223 pp.
- PARTON, W. J.; D. S. SCHIMEL; C. V. COLE & D. S. OJIMA.** 1987. Análisis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51:1173-1179.
- PECORARI, C.; J. GUERIF & P. STENGEL.** 1990. Fitolitos en los suelos pampeanos: influencia sobre las propiedades físicas determinantes de la evolución de la estructura. *Ciencia del Suelo* 8: 135-141.
- PFEFFER, W.** 1893. Druck-und arbeitslestrung durch wachsende pflanzen. *Abh. Sachs. Ges. (Akad.) Wiss.* 33:235-474
- PHILLIPSON, J.** 1971. Methods of study in Soil Ecology. Population, production and energy. *IBP Handbook N° 18.* Blackwell Sci. Publ. 297 pp.

- PILATTI, M. Á.** 1989. Estimación del punto de marchitez permanente en Molisoles de Santa Fe. *C. del Suelo* 7(1-2):103-106.
- PILATTI, M. A. & D. A. GRENON.** 1995. La profundidad enraizable de los suelos. Su estimación a partir de información edáfica. 2a. Ed., corregida y ampliada; software y manual para el usuario. Com. FAVE C-003-AD-003, 29 pp.
- PILATTI, M. Á.; D. A. GRENON & J. A. de ORELLANA.** 2006^a. Cambios por el uso en un Argiudol típico del sur de Santa Fe. Salta, 20° Congr. Argentino de la C. del Suelo.
- PILATTI, M. Á.; S. IMHOFF & J. de ORELLANA.** 2008. Propuesta de interpretación del IHO para evaluar calidad del suelo. 21° Congreso. Argentino de la Ciencia del Suelo. San Luis. 6 pp. Presentación oral.
- PILATTI, M. A. & J. A. de ORELLANA.** 1987. Instrucciones para tomar muestras de suelos. Com. FAVE (2) 10 pp.
- PILATTI, M. Á. & J. A. de ORELLANA.** 1993. Posibles indicadores edáficos de sostenibilidad. II: El Intervalo Hídrico Óptimo. Actas XIV Congr. Argentino de la Ciencia del Suelo:21-22. Mendoza. 474 pp.
- PILATTI, M. A. & J. A. de ORELLANA.** 1994. Instrucciones para tomar muestras de suelos. 2ª Ed., corregida y ampliada. Comunic. FAVE, C-002-AD-002, 10p.
- PILATTI, M. Á., & J. A. de ORELLANA.** 2000. The Ideal Soil. II: Critical Values of the Ideal Soil, for Mollisols in the North of the Pampean Region (In Argentina). *J. of Sustainable Agriculture* 17 (1): 89-111.
- PILATTI, M. Á. & J. A. de ORELLANA.** 2008. El IHO cumple 15 años. Revisión de sus límites críticos. XXI Congr. Argentino de la Ciencia del Suelo. Potrero de los Funes (San Luis). 6 pp.
- PILATTI, M. A.; J. A. de ORELLANA; S. IMHOFF & Á. PIRES DA SILVA.** 2007. Intervalo Hídrico Óptimo de los Suelos: Límites, técnicas de medición, usos y perspectivas. 73 pp. (Inédito)
- PILATTI, M. A.; ORELLANA, J. A. de & FELLI, O. M.** 2003. The Ideal soil: III Fitness of Edaphic Variables to Achieve Sustenance in Agroecosystems. *J. of Sustainable Agriculture* 22 (2):109-132.
- PILATTI, M. Á.; J. A. de ORELLANA; L. J. J. PRIANO; O. M. FELLI & D. A. GRENON.** 1988. Manejos tradicionales y conservacionistas: Incidencia sobre propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Estudio de casos sobre Argiudoles del sur de Santa Fe. *Ciencia del Suelo* 6 (2):19-29.
- PILATTI, M. Á.; L. J. J. PRIANO & J. A. de ORELLANA.** 1987. Modificaciones producidas en el suelo por plantas forrajeras. *Ciencia del Suelo* 5(2):150-157.
- QUIRK, J. P.** 1994. Interparticle forces: a basis for the interpretation of soil physical behaviour. *Adv. Agron.* 53:121-183.
- RUSSELL, E. W.** 1950. Soil conditions and plant growth., 8° ed. Longmans, N. Y.
- SHANMUGANATHAN, R. T. & J. M. OADES.** 1983. Effect of dispersible clay on the physical properties of the B horizon of A Red Brown Earth. *Geoderma* 29: 257-277.
- SILVA A. P. da; B. D. KAY & E. PERFECT.** 1994. Characterisation of the least limiting water range of soil. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 58: 1775-1781.
- SIX, J.; H. BOSSUYT; S. DEGRYZE & K. DENEB.** 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research* 79:7-31.
- SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA.** 2008. Glossary of Soil Science Terms. (<https://www.soils.org/sssagloss/>)
- SUMNER, M. E.** 2000. Handbook of Soil Science. CRC Press. New York, U.S.A. 2146
- STENGEL, P.** 1979. Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. *Ann. Agron.* 30(1): 27-51.

- STEPHAN, S.; A. A. DE PETRE; J. A. de ORELLANA & L. J. J. PRIANO.** 1977. Brunizem soils of the central part of the province of Santa Fe (Argentina) *Pédologie* XXVIII (3):255-283.
- STEPHENS, C. G.** 1954. Reonocimientos edafológicos para la habilitación de tierras. FAO, Estudios agropecuarios N° 20. Roma (Italia), 124 pp.
- STOLZY, L. H. & BARLEY, K.P.** 1968. Mechanical resistance encountered by roots entering compact soils. *Soil Sci.* 105: 297-301.
- TALLARICO,** 1973. Evolución del mejoramiento que producen las pasturas permanentes sobre la estructura del suelo cultivado con especies anuales, especialmente maíz. *IDIA* N° 311:1-7.
- TARDIEU, F.** 1984. Influence du profil cultural sur l'enracinement du maïs. Thèse . DDI, INA-PG. Paris
- TAYLOR, H.M. & L. F. RATCLIFF.** 1969. Root growth pressures of cotton, peas, and peanuts. *Agron. J.* 61: 398-402.
- PROC. INTERN. SYMPOSIUM ON SOIL STRUCTURE.** Ghent: 290-300
- THOMPSON, L .M.** 1962. El suelo y su fertilidad. Ed. Reverté. 470 pp.
- TISDALL, J.M. & J.M. OADES.** 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33:141-163
- TORMENA, C.A.; A. P. DA SILVA; A.C.A. GONCALVES & M.V. FOLEGATTI.** 1999. Intervalo ótimo de potencial da agua no solo: um conceito para avaliacao da qualidade física do solo e manejo da agua na agricultura irrigada. *Rev. Bras. De Engenharia Agrícola Ambiental* 3 (3) 286-292.
- TRI, BUI HUU.** 1968. Dynamique de la granulation du sol sous prairie. *Ann. Agronomiques* 19:415-439.
- USDA.** Soil Survey Staff. 1951. *Soil Survey Manual. Handbook N° 18.* 503 pp.
- UTOMO, W. H. & A. R. DEXTER.** 1981. Soil friability. *Journal of Soil Science* 32, 203-213.
- VEIHMEYER, F. J.** 1927. Soil density and root penetration. *Soil Sci.* 65:487-493,
- VEIHMEYER, F. J. & A. H. HENDRICKSON.** 1948. Methods of measuring field capacity and permanent wilting point of soils. *Hilgardia* 2:125, según Wild, 1992.
- VERA ELIZONDO, W. & M. CASANOVA PINTO.** 2007. Morfología de suelos. Univ. Chile, Fac. de Ciencias Agrarias y Forestales. Mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/cienciaagronomicas/miscelaneas_agronomicas (Página web)
- WATTS, C.W. & A. R. DEXTER.** 1998. Soil friability. Theory, measurement and the effects on management and organic carbon content. *Eur. J. Soil Sci.* 49:73-84.
- WHITELEY, G. M.; W. V. UTOMO & A.R. DEXTER.** 1981. A comparison of penetrometer pressures and the pressures exerted by roots. *Plant & Soil* 61:351-364.
- WILD, A.** 1992. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Mundi-Prensa, Madrid., 1045 pp.
- YODER, R. E.** 1936. A direct method of agrégate análisis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *J. Amer. Soc. Agron* 28:337-351.
- ZAKHAROV, S.A.** 1927. Achievement of Russian science in morphology of soils. *Pedolog. Inv.. Acad. Sci, URSS.*