

Capítulo 7

Dinámica estructural de un Ultisol con distintos manejos del cultivo de la Yerba Mate, Misiones

Structural dynamics of an Ultisol with different managements of the Yerba Mate cultivation, Misiones

^{*}
Héctor José María Morrás
hmorras@gmail.com

** Autor de contacto*

¹ INTA-CIRN, Instituto de Suelos. Nicolás Repetto y Los Reseros s/nº (1686) Hurlingham, Provincia de Buenos Aires

ÍNDICE CAPÍTULO 7

■ RESUMEN	247
■ EXTENDED ABSTRACT	248
■ INTRODUCCIÓN.....	250
■ MATERIALES Y MÉTODOS	252
■ RESULTADOS Y DISCUSIÓN	253
Rasgos macroestructurales a campo	253
Datos analíticos físicos y químicos	253
Porosidad total y discriminada por tamaño de poros.....	256
Tamaño y estabilidad de los agregados	258
Análisis morfológicos de agregados mediante microscopía	262
Análisis de la microestructura	265
Microscopía estereoscópica de muestras no disturbadas	265
Microscopía óptica de cortes delgados	267
■ CONCLUSIONES	271
■ AGRADECIMIENTOS	273
■ BIBLIOGRAFIA.....	273

■ RESUMEN

Una de las principales actividades productivas en los “suelos rojos” de la provincia de Misiones y el nordeste de Corrientes es el cultivo de la Yerba Mate (*Ilex paraguariensis*). De manera tradicional, el control de malezas entre las líneas de plantas se efectúa de manera mecánica mediante pasadas periódicas de implementos de labranza. Este procedimiento además de promover procesos erosivos da lugar al desarrollo de compactaciones subsuperficiales. En este trabajo se presentan algunos de los resultados obtenidos por diversos autores en un ensayo de mantenimiento de cubiertas verdes entre las líneas de Yerba Mate con el propósito de contrarrestar los efectos degradatorios del manejo convencional. Se estudiaron los horizontes A y BA de un Ultisol (Kandihumult típico) localizado en Campo Ramón, Misiones, bajo tres condiciones de manejo: a) suelo virgen en un relicto de selva nativa (tratamiento S); b) una plantación de Yerba Mate con 50 años de monocultivo, en la que el control de malezas en las entrelíneas se llevó a cabo con unas tres pasadas anuales de rastras de discos (tratamiento Yr); c) una fracción del mismo yerbal anterior en cuyas entrelíneas se instaló Pasto Elefante (*Pennisetum purpureum*), manejado como abono verde por medio de cortes periódicos; al momento de estudio, esta especie llevaba seis años de implantada (tratamiento Y+pe). Diversos estudios físicos, químicos, mineralógicos y en particular los análisis morfológicos y microestructurales han mostrado notorios cambios en el tratamiento Yr respecto al suelo virgen de selva, que implican la pérdida de fertilidad y una clara degradación de la estructura original. Por el contrario, la implantación de Pasto Elefante ha producido la mejora de diversos parámetros analíticos y una evidente reorganización estructural del suelo que se refleja en modificaciones de la cantidad y morfología de poros y agregados. Estos resultados ponen en evidencia una dinámica sumamente rápida de los procesos edáficos que influyen tanto en la organización como en la composición del suelo, sugieren el interés de incluir la evaluación de la morfología de agregados como un indicador físico de calidad y salud del suelo, y permiten interpretar más claramente la degradación que se produce con el manejo tradicional del yerbal así como la recuperación resultante de manejos alternativos de base biológica.

Palabras clave

porosidad, agregados,
compactación mecánica,
descompactación biológica.

■ EXTENDED ABSTRACT

The province of Misiones, in the farthest northeast of Argentina, has deep, clayey, red soils (mainly Ultisols, as well as some Oxisols and Alfisols), derived from the weathering of basaltic rocks within a subtropical forest environment. A large area of this province is cultivated with “Yerba Mate” (*Ilex paraguariensis*), a perennial tree whose leaves are used to make an infusion typical for the countries of the region. The plants are usually arranged in lines separated from each other by 3 or 4 m. Traditionally, the control of weeds in the space between the plant lines (in the so called the “streets”) is carried out mechanically by disc harrows that are passed two or three times a year.

Due to the high precipitations that oscillate between 1600 and 2000 mm annually, the predominant hilly landscape with steep slopes, and the agricultural practices that entail the maintenance of bare surfaces, the soils present a high susceptibility to water erosion. Besides, the soil tillage between the rows of Yerba Mate plantations leads to the development of sub-superficial compaction that modifies the soil water dynamics, reducing infiltration and increasing runoff. Thus, to reduce the incidence of erosive processes and improve the physical and chemical conditions of these cultivated soils, various types of green covers in the “streets” between the Yerba Mate plants have been attempted.

With the purpose of evaluating the degree of soil degradation and the eventual beneficial effect of green covers, three situations corresponding to an Ultisol (Typic Kandihumult) located in Campo Ramón, Oberá department, province of Misiones, were studied by several soil researchers : a) a virgin soil under the characteristic subtropical forest of the area (S treatment) (Figure 1-A); b) a Yerba Mate plantation with 50 years of monoculture in which the weed control performed with disk harrow has generated a compacted subsurface layer (Yr treatment) (Figure 1-B); c) the same 50-year-old Yerba Mate plantation in which Elephant grass (*Pennisetum purpureum*) was introduced between the rows as green manure 6 years before the soil study was initiated (Y+pe treatment) (Figure 1-C). In the latter, the Elephant grass was periodically cut when the foliage reached one meter in height, leaving the biomass on the surface as a mulch. The three sites are located along a 150 m-transect, at the same topographical position, at the highest part of a slope.

Various physical, chemical, mineralogical and micromorphological studies were carried out up to about 1.5 m deep in representative soil profiles of each plot. In the case of the two Yerba Mate plots, the profiles were located in the “streets” between the plants. Also, intensive sampling at two depths (0-5 and 5-15 cm) in plots of 50 m x 50 m was performed in the same three treatments, focused on the study of organic matter and soil aggregates. In this chapter, some of the analytical data corresponding to the A and BA soil horizons in each plot are consigned, with special emphasis on morphological and microstructural characteristics and on factors involved in the development of soil porosity and aggregation.

The results obtained in the treatment with soil tillage (Yr) showed remarkable changes with respect to the virgin soil that imply the loss of fertility and a clear degradation of the original structure. In the field, the soil erosion and structural degradation are manifested by a decrease in the thickness of the Ap horizon and by subsurface compaction in the top of the BA horizon (Figure 1-F). The soil in the Yr treatment also shows losses of organic matter and clay, as well as a decrease in associated parameters such as cation exchange capacity (CEC) and water retention capacity (Table 2). In addition, in both horizons of the Yr treatment, Fe and Al have undergone modifications, indicating changes in the physical-chemical soil microenvironment induced by a contrasted pedoclimate with respect to the virgin soil (Table 3). The microscopic analysis showed a redistribution of the Fe oxides in the compacted layer (Figure 8-B), which would reflect conditions of temporary reduction as a consequence of the decrease in permeability. In contrast, the implantation of Elephant grass (Y+pe treatment) has produced, in the short term of six years, the improvement of various chemical parameters and an evident structural reorganization of the soil. The

soil in this treatment shows an increase in organic matter and a slight increase in the CEC and the water retention with respect to Yr. In addition, the Fe fractions as well as the goethite / hematite relationship show intermediate values between the other two treatments, which reflects rapid changes of the physical-chemical environment of the topsoil towards conditions more similar to those of the forest soil.

Regarding porosity and aggregation, the analyses revealed important differences between treatments. The two treatments with Yerba Mate showed a decrease in the total porosity and the proportion of macropores with respect to the forest soil (S treatment). However, the Ap horizon of Y+pe presented an increase in total porosity with respect to Yr, which is given by the increase in the proportion of macropores, particularly those of larger size (Tables 4 and 5). Parallel to changes in porosity, the proportion of microaggregates was clearly increased in the Ap horizon and at the top of the BA horizon of the Yr treatment with respect to the forest soil. This disintegration as a consequence of tillage is accompanied by a parallel decrease in its stability. Conversely, the implantation of Elephant grass has generated a process of re-aggregation of the soil and particularly an increase in the stability of the aggregates (Tables 6, 7 and 8). As with other tropical and subtropical soils, it is clear that here the high content of free sesquioxides plays a considerable role in the stability of their structure. Transformations in the Fe compounds evidenced in relation to the different physical-chemical environments in each treatment could be related to the changes in aggregate stability. However, the studies carried out in this Ultisol show that the organic matter acts as an important agent of cohesion, preventing a greater disintegration of the aggregates in Yr and favoring the re-aggregation in the Y+pe treatment.

The morphological analyses carried out at different scales and with different microscopic methods have highlighted the structural differences between treatments. In the Ap horizon of the tilled soil (Yr), the aggregates have been transformed into spheroidal units with smooth surfaces and dense interiors (Figures 2, 3, 4, 6, and 7). It is interesting to note that this evolution has been suffered by both macro- and microaggregates. This morphological modification would result from a kneading process by friction of the aggregates, which are constituted by a strongly clayey material. The macroporosity in the Ap horizon is reduced and consists almost exclusively of packing pores between the granules. In the BA horizon, and particularly at the top of it, the compaction also generates a decrease in macroporosity, which in this case is constituted mainly by vughs (Fig. 9).

In contrast, in the treatment with implantation of Elephant grass (Y + pe), whose starting situation would be similar to that of the Yr treatment, both macro- and microaggregates show an increase in external irregularity and internal porosity (Figures 2, 3, 4, and 7). Micromorphological analyses also revealed changes in the type of pores with reduction of the packing pores and correlative increase of channels and fissures, as well as a decrease in the degree of compaction of the BA horizon with respect to the tilled soil (Figure 9). These structural modifications would result in an improvement of the hydrophysical behavior in the soil with Elephant grass. On the other hand, these results also suggest that aggregates morphology should be included as a physical indicator of soil quality and health.



In summary, these results show very dynamic edaphic processes as the consequence of different management practices of the Yerba Mate plantations which influence both the composition and the organization of the soil. On the other hand, they allow interpreting more clearly the physical and chemical soil degradation that occurs with the mechanical control of weeds, as well as the recovery occurring in the topsoil resulting from a biological-based management.

Keywords

structure, porosity,
aggregates, mechanical compaction,
biological decompaction.

■ INTRODUCCIÓN

Los suelos característicos de la provincia de Misiones son “suelos rojos” profundos, desarrollados a partir de la meteorización del basalto en un ambiente subtropical húmedo, generando la neoformación de una proporción elevada de arcilla de mineralogía caolinítica (Sanesi, 1965; Morrás & Leiva, 1998; Piccolo *et al.*, 1999; Morrás *et al.*, 2005; 2009; Moretti *et al.*, 2006). Desde el punto de vista taxonómico la mayor parte de estos suelos son Ultisoles, acompañados en menor proporción por Alfisoles y algunos Oxisoles, los que en conjunto ocupan un 34% de la superficie de la provincia (Ligier *et al.*, 1990).

Una de las principales actividades productivas en estos suelos a lo largo de la provincia de Misiones así como en el nordeste de Corrientes es el cultivo de la Yerba Mate (*Ilex paraguariensis*). En los yerbales, habitualmente las plantas se disponen en líneas separadas entre sí unos 3 ó 4 m, en tanto en las líneas las plantas están distanciadas a 2 ó 3 m entre sí. De manera tradicional, y para evitar lo que se considera la competencia de la cubierta herbácea nativa, el control de “malezas” se efectúa de manera mecánica: en las líneas de plantas este control se efectúa mediante azada y/o herbicida, y en el espacio o “calle” que queda entre las líneas mediante rastras de discos que se pasan dos o tres veces por año. En algunos casos se utilizan también otras herramientas de laboreo tales como el arado “tatú” y el subsoador (Venialgo & Sosa, 2015). Este laboreo del suelo se suele complementar además con la utilización de herbicidas, solo en las líneas o también en las “calles” **Figura 1B**  y **C** *1.

Debido a las altas precipitaciones que oscilan entre los 1600 y 2000 mm anuales, a un relieve en general marcadamente ondulado y en gran parte con fuertes pendientes, y a las prácticas de cultivo que conllevan el mantenimiento de suelos desnudos, las tierras presentan una alta susceptibilidad a la erosión hídrica. Desde hace tiempo diversos estudios han evaluado los procesos de erosión en estos suelos (Quevedo & Bellón 1954; Grüner, 1955; Rey Leyes, 1980; Laserre & Ríos, 1983; Fernández *et al.*, 2015), habiendo mostrado también una reducción de la materia orgánica y el deterioro de la estructura de los horizontes superficiales (Casas *et al.*, 1983; Barbaro, 2017). Algunas consideraciones sobre los factores y procesos erosivos en suelos de Misiones se efectúan también en otro Capítulo de esta obra (Moretti & Morrás, 2018).

Con el fin de disminuir la incidencia de los procesos erosivos y mejorar las condiciones físicas y químicas de estos suelos cultivados, Piccolo (1995) llevó a cabo ensayos de mantenimiento de diversos tipos de cubiertas verdes en las “calles” entre las líneas de plantas cultivadas en un Rodudalf. Los parámetros edáficos evaluados mostraron ventajas comparativas de la implantación de Pasto Elefante (*Penissetum purpureum*) respecto a cubiertas de vegetación natural de latifoliadas y gramíneas, y abonos verdes de sorgo o de soja. Estudios posteriores en un Ultisol cultivado con Yerba Mate mostraron claramente modificaciones favorables en diversas propiedades químicas y físicas del suelo como consecuencia de la implantación de Pasto Elefante en las entrelíneas (López Camelo *et al.*, 1996; Piccolo *et al.*, 1997; 1998).

Contrariamente a la consideración prestada a la erosión y a la degradación del horizonte superficial de estos suelos, la atención ha sido escasa respecto a la degradación sub-superficial de los suelos rojos por efecto de las labranzas. Leiva (1997) mostró la disminución en la proporción de macro y mesoporos en la subsuperficie de un Kandihumult con manejo tradicional de la Yerba Mate respecto al suelo virgen. Recientemente Barbaro & Sosa (2015) determinaron la porosidad total y el porcentaje de macroporos de Ultisoles cultivados con Yerba Mate con manejo tradicional y manejo conservacionista, observando en el


primer caso disminución relativa de los macroporos hasta el metro de profundidad. También, Venialgo & Sosa (2006) en Ultisoles de Corrientes con Yerba Mate encontraron un incremento de la resistencia a la penetración entre 6 y 24 cm de profundidad en los manejos con rastra de disco. Por otro lado, algunos trabajos han mostrado específicamente la existencia de capas compactadas como consecuencia de la monocultura de la Yerba Mate **Figura 1F** ©, así como las posibilidades de revertir esa condición física mediante la implantación de abonos verdes (Morrás & Piccolo, 1996; 1998; Morrás *et al.*, 1998; 1999; Leiva, 1977). Una síntesis de resultados publicados e inéditos obtenidos por estos últimos autores sobre la degradación y recuperación de las condiciones físicas de horizontes superficiales y sub-superficiales de suelos de Yerbal serán referidos aquí a continuación.





Figura 1: Imágenes de la vegetación y los suelos de los tres tratamientos referidos en este trabajo. **A:** vegetación del relicto de Selva (S). **B:** Tratamiento de Yerbal convencional (Yr) con control de malezas mediante rastra de discos en las calles y de herbicida en las líneas de plantas. La imagen corresponde a una situación previa al control de malezas mediante laboreo del suelo, en un extremo del lote donde se pueden apreciar también los procesos erosivos. **C:** detalle del límite entre la calle y la línea; se puede observar un desnivel de unos 15 cm debido a la erosión en la calle. **D:** Tratamiento con Pasto Elefante implantado en la calle (Y+pe). **E:** horizontes A y BA en el suelo virgen de Selva. **F:** suelo en la calle del Yerbal convencional (Yr). Puede observarse el piso de arado y el desvío de raíces en el contacto con la capa compactada. **G:** perfil en tratamiento con Pasto Elefante. Es notoria la gran cantidad de raíces que penetran en el horizonte BA.

Figure 1: Images of the vegetation and soils of the three treatments referred to in this work. **A:** vegetation of the forest relict (S). **B:** Treatment of conventional Yerba Mate management (Yr) with control of weeds by disc harrow in the streets and herbicide in plant lines. The image corresponds to one of the edges of the plot where erosive processes are evident. **C:** detail of the boundary between the street and the line; a step of about 15 cm due to erosion is visible. **D:** treatment with Elephant grass implanted in the street (Y+pe). **E:** A and BA horizons in the virgin soil of the forest. **F:** soil profile in the street of the Yr treatment; the disc harrow pan and the deviation of roots in the contact with the compacted layer can be observed. **G:** profile in the Y+pe plot. The large number of roots that penetrate the BA horizon is notorious.

■ MATERIALES Y MÉTODOS

Se estudiaron perfiles de suelo en tres situaciones de manejo de un Ultisol (Kandihumult típico) situado en la localidad de Campo Ramón, departamento Oberá, en la región de la Meseta Central Preservada. El relieve es fuertemente ondulado, con lomas cupuliformes de pendientes medias y gradientes de 5-9%. El primer perfil corresponde al suelo virgen en un relicto de selva nativa (situación S) **Figura 1A** *2.


El segundo perfil corresponde a una plantación de Yerba Mate (*Ilex paraguariensis*) con 50 años de monocultivo, con líneas de plantas distanciadas a 3,5 m entre sí (situación Yr). El control de malezas en las entrelíneas se llevó a cabo con unas tres pasadas anuales de rastras de discos **Figura 1B** *2. El tercer perfil corresponde al mismo yerbal en cuyas entrelíneas se instaló Pasto Elefante (*Pennisetum purpureum*), manejado como abono verde por medio de cortes periódicos con desmalezadora cuando el follaje alcanzaba el metro de altura, con un nivel de corte de 20 cm. Esta biomasa permaneció en superficie como un mulch, sin ningún otro tipo de operación. Al momento de estudio, esta especie llevaba seis años de implantada (situación Y+pe) **Figura 1C** *2. Los tres perfiles se hallan distanciados a escasos 50 m uno de otro, a lo largo de una transecta de 150 m de longitud en una misma posición topográfica (media loma alta).

Diversos estudios físicos, químicos, mineralógicos y micromorfológicos se llevaron a cabo hasta alrededor de 1,5 m de profundidad en cada uno los perfiles representativos de cada parcela; en el caso de los yerbales, los perfiles se ubicaron en las “calles” o entrelíneas (Morrás & Piccolo, 1996; 1998; Leiva, 1997). Respecto a la mineralogía de este suelo se puede mencionar que la fracción arcilla se halla constituida por un 85% de caolinita y un 15% de vermiculita hidroxilada, también denominada pseudoclorita, además de pequeñas proporciones no cuantificadas de cuarzo y óxidos de hierro (Morrás & Leiva, 1998). Si bien en los perfiles aquí estudiados no se discriminaron los minerales caolíníticos, Piccolo *et al.* (1999) encontraron en el horizonte A del suelo de Selva una cierta proporción de haloisita, la que no aparece en las parcelas con Yerba Mate. Análisis químicos permitieron establecer que los horizontes A y BA de este suelo presentan alrededor de 19 % de hierro total, el que disminuye a alrededor de un 16% en el horizonte Bt, cuya mayor parte se encuentra como óxidos cristalinos libres (Leiva *et al.*, 1998; Mijovilovich *et al.*, 1999). Diversos estudios sobre la mineralogía del hierro tanto en el suelo total como en distintas fracciones granulométricas indican la presencia de hematita, goethita y magnetita-maghemita, cuyas proporciones relativas varían según la fracción granulométrica y la profundidad en el perfil. También los datos sugieren la existencia de ferrihidrita en la fracción arcilla. Como se verá, los resultados obtenidos ponen en evidencia cambios en las proporciones de hematita y goethita en los horizontes superficiales en relación con los distintos tratamientos de manejo aquí estudiados (Saragovi *et al.*, 1997; Morrás *et al.*, 1998; Mijovilovich *et al.*, 1998; 1999; Causevic, 2001).

En este trabajo se consignarán exclusivamente algunos de los datos analíticos correspondientes a los horizontes A y BA de cada perfil, con especial énfasis en características morfológicas y microestructurales. Por otro lado, se mencionarán también resultados obtenidos por Piccolo *et al.* (1996; 1997; 1998) quienes estudiaron la distribución, la estabilidad y la concentración de carbono orgánico de los agregados del suelo de los horizontes superficiales de las parcelas mencionadas, con muestreos intensivos a dos profundidades (0-5 y 5-15 cm).

■ RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rasgos macroestructurales a campo

La macroestructura de los horizontes A y BA observada en el campo muestra diferencias claras entre las tres situaciones. En la **Tabla 1**  se describen sus rasgos principales en sus niveles jerárquicos de organización, de acuerdo a los criterios usados en micromorfología (Morrás, 2015). En el suelo de selva el horizonte A presenta grumos muy gruesos, con fuerte grado de desarrollo los que se organizan en bloques subangulares medios (1-2 cm). Por el contrario, en el horizonte Ap del Yr la estructura es granular, con agregados de unos 5 mm en promedio. En Yr+p la estructura primaria del Ap se presenta también en gránulos, los que en este caso notoriamente se organizan en una estructura secundaria de bloques subangulares medios.





En el suelo de selva el límite entre los horizontes A y BA es plano, y la transición es abrupta **Figura 1E** ^{*3}. No obstante la estructura no presenta grandes diferencias entre ambos horizontes. Por el contrario en los sitios Yr, además de las diferencias en la morfología y tamaño de agregados entre ambos horizontes, es notoria la presencia de una capa compactada en la parte superior del horizonte BA **Figura 1F** ^{*3}. En estos casos el límite del Ap con la capa compactada es ondulado y su profundidad es mayor en el centro de la "calle" y menor en la cercanía de las líneas de yerbal. Por otro lado, el espesor del Ap es menor y el contacto con la capa compactada es más marcado en el suelo del sitio Yr que en el sitio Y+pe. En el sitio Yr resultó notoria la desviación de las raíces de las malezas en el contacto con la capa compactada; por el contrario, en el sitio Y+pe las raíces del Pasto Elefante mostraron una menor afectación penetrando en general de manera vertical o subvertical en el horizonte BA **Figura 1G** ^{*3}. Debido a estos rasgos morfológicos de campo, en el horizonte BA de los tratamientos Yr e Y+pe se distinguió una capa superior BAd con evidencias más fuertes de compactación.

Tabla 1: Descripción sintética de la estructura del suelo en dos niveles jerárquicos (agregados de primero y segundo orden), en los perfiles representativos de cada tratamiento (Morrás & Piccolo, 1998).

Table 1: Brief description of the soil structure in two hierarchical levels (aggregates of first and second order), in the representative profiles of each treatment (Morrás & Piccolo, 1998).

	Selva (S)		Yerbal con rastra (Yr)		Yerbal con cobertura (Y+pe)	
Horizonte	Estructura primaria	Estructura secundaria	Estructura primaria	Estructura secundaria	Estructura primaria	Estructura secundaria
A	Migajosa, gruesa a muy gruesa, fuerte	Bloques subangulares medios, fuerte	Granular, media a gruesa, fuerte	-	Granular fina a media, fuerte	Bloques subangulares medios, fuerte
BA	Bloques subangulares muy finos	Bloques subangulares medios a gruesos, fuerte	Bloques subangulares medios,	Bloques subangulares, gruesos, fuerte	Bloques subangulares gruesos a muy gruesos, fuerte	-

Datos analíticos físicos y químicos

Como muestra la **Tabla 2** , el contenido de materia orgánica en el horizonte superficial presenta una disminución marcada en los perfiles de los lotes cultivados respecto al suelo virgen. Sin embargo se constata un incremento en la situación de Y+pe, respecto a la de Yr sin cobertura del suelo. El porcen-





taje de arcilla del horizonte A también disminuye notoriamente en los lotes cultivados, aunque la disminución es mayor en el manejo tradicional. Estos datos reflejan claramente los procesos de erosión superficial derivados del manejo tradicional con laboreo del suelo, como se constata en la **Figura 1B** . En el tratamiento Y+pe aparentemente se habría detenido ese proceso erosivo desde el momento de la incorporación de la cubierta verde. Por otro lado, la reducción de materia orgánica y de arcilla en los horizontes A de los tratamientos cultivados respecto al suelo de Selva se refleja de manera paralela en la humedad equivalente y en la capacidad de intercambio catiónico. Sin embargo, en el suelo con Pasto Elefante los valores de estas dos propiedades son ligeramente mayores que en el manejo tradicional, indicando un incremento en la capacidad de retención de agua y en la fertilidad potencial. Debe notarse que el porcentaje de saturación de bases (V) y el pH disminuyen en los tratamientos cultivados respecto al suelo virgen; esta disminución es mayor en Y+pe lo cual refleja una fuerte extracción de bases y acidificación concomitante, lo cual es atribuible a la importante producción de masa verde del Pasto Elefante.

Tabla 2: Principales propiedades químicas y físicas de los horizontes A y BA de los perfiles de suelo de las tres situaciones estudiadas (tomado de Morrás & Piccolo, 1998).


Table 2: Main chemical and physical properties of the A and BA horizons of the soil profiles of the three studied situations (from Morrás & Piccolo, 1998).


	Selva (S)		Yerbal c/rastra (Yr)			Yerbal c/cobertura (Y+pe)		
	A	BA	Ap	BAd	BA	Ap	BAd	BA
Profundidad (cm)	0-10	10-34	0-6	6-15	15-35	0-10	10-17	17-45
MO (%)	6,7	3,0	3,7	3,4	2,2	4,2	3,4	2,5
Arcilla (%)	62,7	63,2	55,4	59,0	63,9	57,9	57,1	65,0
Humedad equiv. (%)	30,8	30,4	24,0	25,8	27,2	25,7	27,1	27,2
CIC (cmolc kg ⁻¹)	23,9	16,8	15,8	15,4	14,3	16,5	14,8	14,5
V (%)	76,5	66,1	58,2	50,6	52,4	41,8	35,8	51,0
pH-agua (1:2,5)	6,0	5,3	5,2	5,2	5,3	5,0	5,0	5,0
Dap (g m ⁻³)	1,03	1,30	1,10	1,40	1,39	1,15	1,37	1,28

La densidad aparente (Dap) del suelo virgen es algo mayor en el horizonte BA respecto al horizonte superficial. Sin embargo en ambos sitios con Yerba Mate la Dap de la parte superior del horizonte BA (subhorizonte BAd) se incrementa respecto al BA del suelo virgen, llegando en Yr a un valor de 1,4 gm⁻³. El valor crítico considerado restrictivo para la penetración de raíces varía según los autores, aunque está establecido que ese valor es menor cuando el contenido de arcilla aumenta. Según Veihmeyer & Hendrickson (1948) para suelos arcillosos el valor crítico oscila entre 1,46 y 1,63 gm⁻³. Para Arshad *et al.* (1996) y USDA (2008) el valor limitante para este tipo de suelos se sitúa en 1,47 gm⁻³. Para el caso de un Oxisol de Brasil (Latossolo Roxo) estudiado por Corsini & Ferraudo (1999), la restricción para el desarrollo de raíces se manifestó con valores de Dap que oscilaron desde 1,27 a 1,57 gm⁻³. Valores elevados de Dap son indicativos de baja porosidad y compactación, lo cual puede causar dificultad en el desarrollo de raíces. El efecto desfavorable de la compactación en el desarrollo de las plantas es también indirecto, dado que limita la permeabilidad y suele generar una capa de agua colgante generando anoxia (Trouse, 1971). Esta restricción en la penetración del agua es particularmente perjudicial en climas húmedos. Por otro lado esto puede incrementar la escorrentía y erosión en ambientes con pendientes pronunciadas (USDA, 2008).

Si bien el máximo valor de Dap medido en el tratamiento Yr se encuentra apenas en el límite generalmente aceptado como restrictivo, en el caso aquí estudiado el efecto de esa impedancia en el desarrollo radicular de malezas fue evidente tanto en las observaciones a campo **Figura 1F** ^{*5}, como en las observaciones microscópicas en el contacto con la capa compactada **Figura 7** ^{*1}. Por otro lado, en el tratamiento Y+pe se constata una ligera disminución de la Dap del horizonte BA particularmente en la profundidad de 17-45 cm. Esta disminución de la densificación resulta también concordante con el agresivo crecimiento del Pasto Elefante y el notorio desarrollo de las raíces observado a campo **Figura 1G** ^{*5}.

En el Ultisol estudiado se llevaron a cabo también fraccionamientos de las formas del hierro con el fin de evaluar su dinámica bajo las diferentes condiciones de manejo y su influencia en la agregación (Leiva, 1997; Leiva *et al.*, 1998). El Fe libre, determinado con el método del ditionito-citrato-bicarbonato, corresponde a los oxi-hidróxidos que no forman parte de las estructuras silicatadas. El hierro extraído con oxalato ácido de amonio corresponde a oxi-hidróxidos pobremente ordenados, y es considerado la fracción de “hierro activo” (Mitchell *et al.*, 1964) constituida por compuestos amorfos derivados de meteorización reciente (Mc Keague, 1966). El hierro extraído con pirofosfato de sodio se encuentra asociado a la materia orgánica en complejos de tipo fulvatos y humatos. El hierro cristalino, constituido principalmente por hematita y goethita, se obtiene por diferencia entre el total de Fe extraído con ditionito y los otros dos extractantes. También, y dado que el aluminio libre juega asimismo como factor de agregación, se determinaron los contenidos de este elemento en los extractos obtenidos con DCB y con oxalato.

Como se observa en la **Tabla 3** , en este suelo la mayor parte del Fe total se encuentra como hierro libre cristalino. Por otro lado, se constatan diferencias entre los horizontes A de los tres tratamientos, con mayor contenido de hierro libre en la situación de Selva, el menor contenido en el Yermal convencional y un valor intermedio en el suelo con Pasto Elefante. El Fe amorfo en este Ultisol es elevado comparado con Latosoles de Brasil (Fontes & Weed, 1991). De acuerdo a lo reportado por Leiva *et al.* (1998) esta fracción aumenta en el horizonte Bt y luego disminuye progresivamente con la profundidad, lo cual se corresponde con resultados obtenidos en otro Ultisol de Misiones (Ganeau, 2004). El Fe asociado a la materia orgánica sólo se detectó en los horizontes A y BA, no así en los horizontes más profundos (Leiva *et al.*, 1998). Si bien la proporción de esta fracción es reducida, los resultados en valor absoluto y en relación con el contenido de Fe libre muestran un contenido mayor en el perfil de Selva, un contenido menor en el Yermal laboreado y un valor intermedio en el Yermal con Pasto Elefante.

En cuanto al aluminio **Tabla 3** , se constata que el Al total es algo mayor que el de Fe; por el contrario la cantidad de Al libre en el suelo es notoriamente más pequeña que la de Fe libre. También en comparación con el hierro libre, las formas menos ordenadas de Al son proporcionalmente más elevadas que las del Al mejor cristalizado. Estos resultados son coincidentes con los obtenidos en otro perfil de Misiones en el cual el Al-oxalato constituyó la mitad o más del Al libre del suelo (Ganeau, 2004). Considerando los tratamientos, se observa que las formas libre de Al se incrementan ligeramente y en proporciones similares en los dos sitios con Yerba Mate respecto al suelo de Selva. Este resultado se relaciona con la disminución del pH del suelo determinada en los dos lotes cultivados con Yerba Mate.

Por otro lado, en estos tratamientos también se estudió la mineralogía de los óxidos de hierro, en particular la relación goethita/hematita. Estos óxidos una vez formados como consecuencia de los procesos pedogénicos de meteorización, están sujetos a modificaciones continuas en relación con los


cambios del ambiente que modifiquen las condiciones físicas y químicas del suelo (Schwertmann & Taylor, 1989). De acuerdo a los resultados reportados por Saragovi *et al.* (1997) y Morrás *et al.* (1998), en el horizonte A del suelo de Selva la hematita representa un 43% de los óxidos de Fe, aumenta a 56% en el tratamiento Yr y disminuye a 50% en Y+pe **Tabla 3** . El incremento relativo de hematita en Yr se podría explicar por el incremento del desecamiento del suelo, lo que aceleraría la cristalización de este óxido a partir de ferrihidrita. En el lote con Pasto Elefante, con un contenido intermedio de hematita, el mayor contenido de materia orgánica (y como se mencionará luego, por los cambios en su composición), la mayor capacidad de retención de agua y el pH más ácido, probablemente inhiben la cristalización de hematita y favorecen la formación de goethita.

Tabla 3: Contenidos de hierro y aluminio total determinados por fluorescencia de RX y de formas libres de Fe y Al obtenidas por fraccionamiento químico, en los tres perfiles del Ultisol (según Leiva, 1997; Leiva *et al.*, 1998). Proporción relativa de goethita y hematita obtenida por espectroscopía Mössbauer (según Saragovi *et al.*, 1997 y Morrás *et al.*, 1998)

Table 3: Total iron and aluminum content determined by RX fluorescence and Fe and Al free forms obtained by chemical fractionation in the three Ultisol profiles (according to Leiva, 1997, Leiva *et al.*, 1998). Relative proportion of goethite and hematite obtained by Mössbauer spectroscopy (according to Saragovi *et al.*, 1997 and Morrás *et al.*, 1998)

	Selva (S)		Yerbal con rastra (Yr)			Yerbal con cobertura (Y+pe)		
	A	BA	Ap	BAd	BA	Ap	BAd	BA
Profundidad (cm)	0-10	10-34	0-6	6-15	15-35	0-10	10-17	17-45
Fe-total (Fe_2O_3 %)	18,95	18,21	-	-	-	-	-	-
Fe-d (Fe_2O_3 %)	16,10	16,10	14,40	15,70	15,80	15,30	15,80	15,70
Fe-c [d-(o+p)] (Fe_2O_3 %)	15,38	15,24	13,67	15,01	14,77	14,66	15,07	14,80
Fe-o (Fe_2O_3 %)	0,72	0,86	0,73	0,69	1,03	0,64	0,73	0,92
Fe-p (Fe_2O_3 %)	0,13	0,07	0,07	0,06	0,03	0,09	0,07	0,06
(Fe-p / Fe-d)100	0,80	0,43	0,48	0,38	0,18	0,58	0,44	0,38
Al-total (Al_2O_3 %)	22,53	22,65	-	-	-	-	-	-
Al-d (Al_2O_3 %)	0,38	0,38	0,48	0,53	0,58	0,44	0,52	0,48
Al-o (Al_2O_3 %)	0,18	0,20	0,20	0,19	0,20	0,20	0,21	0,22
Goethita (%)	56,5	-	44,0	-	-	50,0	-	-
Hematita (%)	43,5	-	56,0	-	-	50,0	-	-

Porosidad total y discriminada por tamaño de poros


El análisis de la porosidad del suelo mediante el método de desorción de agua bajo presión (olla de Richards) muestra asimismo diferencias entre los horizontes A y BA de las tres situaciones (Leiva, 1997; Morrás *et al.*, 1998). La porosidad total en el horizonte A es mayor en el tratamiento S (63%), se reduce notablemente (52%) en el tratamiento Yr, y aumenta ligeramente (55%) en el tratamiento Y+pe **Tabla 4** . Por otro lado, los datos indican que las diferencias en la porosidad total están dadas por variaciones en la proporción de macro y mesoporos, en tanto la proporción de microporos permanece aproximadamente constante en los tres lotes comparados. En el horizonte A, los poros mayores a 60 μm constituyen un 22% del volumen del suelo en la situación de Selva, lo que se reduce a un 12% en el Yerbal tradicional y aumenta a un 15% en el suelo con Pasto Elefante. En el horizonte BA la porosidad total disminuye respecto al horizonte superficial y presenta escasa diferencia entre el suelo virgen y los lotes cultivados. Sin embargo, en el horizonte BA del suelo de Selva el volumen de macroporos en el suelo es de un 12%, en el horizonte BA compactado del Yerbal tradicional disminuye a algo más de un 7%, y aumenta en el Yerbal con Pasto Elefante a un 9 %.

Tabla 4: Porosidad (en volumen de suelo) determinada por desorción de agua en los perfiles representativos de los tratamientos estudiados. Clasificación de tamaños de acuerdo a Kohnke (1972) según función de los poros. Para los tratamientos Yr e Y+pe se promediaron los valores de los subhorizontes BAd y BA dado que eran muy similares, aunque en los dos tratamientos el volumen poral fue algo menor en los subhorizontes BAd (a partir de Leiva, 1997; Morrás *et al.*, 1998).

Table 4: Porosity (in soil volume) determined by desorption of water in the representative profiles of the treatments studied. Classification of sizes following Kohnke (1972) according to the function of the pores. For the Yr and Y+pe treatments the values of the subhorizons BAd and BA were averaged since they were very similar, although in the two treatments the pore volume was somewhat lower in the BAd subhorizons (from Leiva, 1997; Morrás *et al.*, 1998).

Tratamientos	Horiz.	Prof. cm	Porosidad (% v/v de suelo total)			
			Total	Macro >60 µm	Meso 60-3 µm	Micro <3 µm
S	A1	0-10	63,0	22,3	9,7	31,0
	BA	10-34	51,7	12,3	6,3	33,1
Yr	Ap	0-6	52,2	11,9	8,6	31,7
	BA	6-35	49,3	7,5	6,2	35,6
Y+pe	Ap	0-10	54,9	14,9	9,8	30,2
	BA	10-45	49,4	8,9	6,5	34,0

Los estudios detallados de las fracciones de poros realizados por Leiva (1997) indican que las diferencias entre tratamientos son particularmente notorias en los macroporos. En la **Tabla 5** se presenta un análisis discriminado de la macroporosidad, en este caso diferenciando también los valores entre los horizontes BAd y BA de ambos tratamientos con Yerba Mate. De acuerdo a estos datos se constata que en el horizonte A1 del suelo de Selva la mayor proporción de macroporos corresponde a aquellos mayores a 300 µm, lo que favorecería el drenaje rápido. En el horizonte Ap del tratamiento de Yr los macroporos se reducen a la mitad del suelo virgen, tanto en los poros de 150-300 µm como particularmente en los mayores a 300 µm. Por otro lado, resulta notorio que en horizonte Ap del tratamiento con Pasto Elefante se incrementa la proporción de poros >300 µm, adquiriendo proporciones intermedias entre los del suelo de Selva y el Yerbak convencional. En cuanto al horizonte BA, en el suelo de Selva el volumen total de macroporos se reduce naturalmente respecto al horizonte A. Una reducción adicional de macroporos se produce también en los tratamientos cultivados. Sin embargo puede notarse que la proporción de macroporos mayores a 300 µm en la capa compactada BAd es algo más elevada en el tratamiento Y+pe (4,7%) que en Yr (2,3%), indicando que aquí también ha habido un incremento de la macroporosidad por efecto del Pasto Elefante.

Tabla 5: Distribución por tamaño de los macroporos en los horizontes A y BA de los perfiles representativos de los tres tratamientos estudiados (en Leiva, 1997).

Table 5: Size distribution of macropores in the A and BA horizons of the profiles in the treatments studied (in Leiva, 1997).

Tratamientos	Horiz.	Prof. cm	Macroporos (% v/v de suelo total)			
			Total	>300 µm	300-150 µm	150-60 µm
S	A1	0-10	22,3	12,9	5,4	4,0
	BA	10-34	12,3	6,8	2,4	3,1
Yr	Ap	0-6	11,9	4,7	3,0	4,2
	BAd	6-15	7,7	2,3	2,9	2,5
	BA	15-35	7,2	3,4	1,6	2,2
Y+pe	Ap	0-10	14,9	7,2	3,1	4,6
	BAd	10-17	8,9	4,7	2,2	2,0
	BA	17-45	8,8	3,5	2,8	2,5

Estos análisis indican que el proceso de degradación estructural como consecuencia del laboreo ha quedado impreso en los horizontes Ap y en los BA de los dos tratamientos con Yerba Mate, reflejándose tanto en la disminución de volumen total de poros como en la disminución de la proporción de los macroporos. Por otro lado, también se puede constatar que en el horizonte Ap del Yermal con Pasto Elefante se ha producido un incremento de la porosidad total que reside específicamente en el incremento de los macroporos, en particular aquellos de tamaño más grande. El incremento de macroporos en el tratamiento Y+pe se relacionaría en primer lugar y de manera directa con el abundante desarrollo de raíces del Pasto Elefante y los vacíos que ellas dejan. Por otro lado, el incremento de materia orgánica observado en esta situación, junto con una probable estimulación de la actividad microbiana y producción de sustancias aglutinantes, contribuirían a la formación de agregados y a su estabilización (Cosentino & Chenu, 2008; Velde & Barré, 2010) promoviendo así indirectamente el incremento de la porosidad. Estos resultados concuerdan con otros estudios donde se han utilizado plantas como cubierta verde, en especial Kudzu (*Pueraria phaseoloides*) (Chauvel *et al.*, 1991) así como Kudzu y gramíneas nativas (Geraldes *et al.*, 1996) sobre Latosolos arcillosos de Brasil, en los que se ha obtenido también un incremento de la macroporosidad del suelo.

Finalmente, en los horizontes más profundos de los tres perfiles aquí estudiados no se encontró diferencia en la proporción relativa entre microporos y macro+mesoporos, siendo esta en términos generales de 3:1 en el horizonte Bt1 (aproximadamente entre los 40-100 cm de profundidad), de 4:1 en el Bt2 (aprox. entre 100 y 155 cm) y de 5:1 en el horizonte BC1 (aprox. entre 155-205+ cm), coincidente con el incremento del contenido de arcilla y la disminución de raíces en el mismo sentido (Leiva, 1997).

Tamaño y estabilidad de los agregados

Los estudios de distribución de agregados muestran que en las tres situaciones de manejo prevalecen los macroagregados, aunque diferencias notables han sido observadas entre ellas. A partir de los datos reportados en Leiva (1997) y Morrás *et al.* (1998) resultantes del fraccionamiento con tamizado en seco, en la **Tabla 6** se han agrupado las diez fracciones del trabajo original en las cuatro clases de tamaño propuestas por Bullock *et al.* (1985) para distintos componentes del suelo. Dado que en este caso el suelo virgen (S) se caracteriza por una estructura primaria con agregados esferoidales grandes y bloques muy finos, esta clasificación y su denominación de los rangos aparecen útiles para establecer comparaciones entre tratamientos. Así, en los horizontes A y BA del suelo de selva prevalecen las fracciones de mega y macroagregados, en tanto en las fracciones de menor tamaño sus proporciones son mínimas. Contrariamente, en ambos tratamientos con Yermal el cultivo ha generado importantes cambios en la agregación del suelo, presentándose una situación claramente diferenciada entre horizontes Ap y BA. Por un lado, en el manejo tradicional Yr se observa una disminución de la fracción de mega-agregados, la que es particularmente notoria en el horizonte Ap y mucho menos marcada en el BA; paralelamente se constata un incremento importante en la fracción de macroagregados y otro menor en la de mesoagregados. Por otro lado, en el horizonte Ap del suelo con Pasto Elefante (Y+pe) se observa un incremento de los mega-agregados respecto a Yr, en tanto en el horizonte BA del tratamiento Y+pe la distribución es similar a la del tratamiento Yr. También, el cálculo del diámetro medio ponderado de diez fracciones de agregados tamizados en seco (Leiva, 1997), mostró claramente un mayor tamaño y estabilidad de los agregados en el horizonte A del suelo de Selva respecto a los dos tratamientos del suelo cultivado con Yerba Mate.

Tabla 6: Distribución de agregados del suelo obtenida por tamizado en seco en los perfiles representativos de cada tratamiento (en Morrás *et al.*, 1998).

Table 6: Distribution of soil aggregates obtained by dry sieving in the representative profiles of each treatment (in Morrás *et al.*, 1998).

Tratamientos	Horiz.	Prof. cm	Agregados (%)			
			Mega >5.000 µm	Macro 5.000-500 µm	Meso 500-50 µm	Micro <50 µm
S	A1	0-10	49,5	45,2	4,9	0,4
	BA	10-34	53,4	41,4	4,7	0,4
Yr	Ap	0-6	14,5	66,7	17,6	1,1
	BA	6-35	44,7	46,7	7,8	0,8
Y+pe	Ap	0-10	20,4	58,4	19,9	1,3
	BA	10-45	45,4	46,3	7,8	0,5

* 1

Tisdall & Oades (1982) estudiaron la estabilidad de agregados de suelos, considerando como macroagregados aquellos >250 µm y microagregados los menores a ese tamaño. Los autores señalan que la estabilidad de los macroagregados depende principalmente de agentes de unión temporarios tales como las raíces e hifas, y entre éstas principalmente las de micorrizas; por lo tanto la estabilidad de los macroagregados del suelo dependería del manejo. Por el contrario los agregados <250 µm se encuentran estabilizados frente al mojado rápido y el disturbio mecánico –incluyendo el cultivo– debido a que contienen diversos tipos de agentes de cohesión (compuestos húmicos asociados con compuestos de hierro y aluminio y con aluminosilicatos) cuyos efectos son relativamente permanentes y aditivos; en consecuencia la estabilidad de los microagregados no sería influenciada por cambios en la materia orgánica causada por diferentes manejos. Según estos autores la estabilización de agregados con sesquióxidos de hierro y aluminio es particularmente importante cuando el contenido de éstos en el suelo es superior al 10%. Por su parte Oades & Waters (1991) indican la existencia de una jerarquía de agregación en Alfisoles y Molisoles debido a que los materiales orgánicos, incluyendo raíces e hifas, son los agentes de estabilización dominantes de los macroagregados. En estos suelos la degradación de los macroagregados (>250 µm) genera microagregados menores a ese tamaño que son considerablemente más estables que los agregados mayores. Por el contrario en los Oxisoles los óxidos de hierro y aluminio son los agentes de estabilización dominantes, por lo cual en esos suelos no habría jerarquía de organización de agregados; la ruptura de los macroagregados llevaría directamente a la liberación de partículas menores a 20 µm sin etapas intermedias.

Sin embargo, los resultados obtenidos en este suelo Ultisol presentan una situación diferente a las anteriormente mencionadas. A los efectos de comparación con dichos trabajos, en la **Tabla 7** se representan los porcentajes de macro y microagregados de los tratamientos aquí estudiados, tomando en este caso un límite de 300 µm entre ambas fracciones conforme a los tamices utilizados por Leiva (1997). Como puede observarse, en ambos tratamientos con Yerba Mate se incrementó la proporción de microagregados menores a 300 µm, los que de acuerdo a Leiva (*op. cit.*) se concentran específicamente en la fracción de microagregados mayores (105-300 µm). En este trabajo realizado en los perfiles de suelo representativos de cada tratamiento, se constata que el incremento de microagregados se produce particularmente en el horizonte Ap, a expensas de los macroagregados.

Tabla 7: Distribución de macro y microagregados obtenidos por tamizado en seco en los perfiles de suelo representativos de cada tratamiento; (simplificado en dos tamaños a partir de datos del fraccionamiento detallado realizado por Leiva, 1997).

Table 7: Distribution of macro and microaggregates obtained by dry sieving in the soil profiles representative of each treatment; (simplified in two sizes from detailed fractionation data by Leiva, 1997).


Tratamientos	Horiz.	Prof. cm	Agregados (%)	
			Macro >300 µm	Micro <300 µm
S	A1	0-10	96,2	3,8
	BA	10-34	96,2	3,8
Yr	Ap	0-6	86,9	13,1
	BA	6-35	93,4	6,6
Y+pe	Ap	0-10	84,5	15,5
	BA	10-45	93,8	6,2

Los resultados expuestos concuerdan con los reportados en Piccolo *et al.* (1997) y Morrás & Piccolo (1998) correspondientes a muestreos intensivos en los mismos tres tratamientos (muestras compuesta de 7 submuestras tomadas en parcelas de 50 m x 50 m, a las profundidades de 0-5 cm y 5-15 cm) en los que se analizó la estabilidad de agregados mediante tamizados en seco y húmedo. Tomando el límite de tamaño sugerido por Tisdall & Oades (1982) para diferenciar entre macro y microagregados, en la **Tabla 8** se sintetizan los datos obtenidos en estos dos últimos trabajos en una fracción de microagregados menores a 250 µm y en dos fracciones de macroagregados mayores a ese límite. En primer lugar, y comparando ambos procedimientos de fraccionamiento, resulta notable que en el tamizado en húmedo no se produzca un incremento de la proporción de microagregados, lo que indica la existencia de fuerzas de cohesión intensas, propias de este tipo de suelo. Por otro lado, y comparando los tratamientos de manejo entre si, se observa que en Yr se ha incrementado claramente la proporción de microagregados respecto al suelo de Selva. En cambio, la proporción de microagregados en Y+pe es menor que en el caso anterior, lo cual sugiere en este caso un proceso de re-agregación. Al mismo tiempo en el tamizado en húmedo del tratamiento Y+pe se ha constatado un incremento marcado de la proporción de los macroagregados de mayor tamaño respecto a las otras dos situaciones S e Yr, tanto en superficie como en el horizonte BA.




Tabla 8: Distribución de macro y microagregados del suelo obtenida por tamizado en seco y en húmedo en muestreos intensivos en los lotes estudiados (a partir de datos reportados por Morrás & Piccolo, 1998).

Table 8: Distribution of macro and microaggregates of the soil obtained by dry and wet sieving in intensive sampling in the plots studied (from data reported by Morrás & Piccolo, 1998).

Tratamientos	Prof. cm	Agregados en seco (%)			Agregados en húmedo (%)		
		>8.000 µm	250-8.000 µm	<250 µm	>8.000 µm	250-8.000 µm	<250 µm
S	0-5	15	79	6	17	76	7
	5-15	12	81	7	16	77	7
Yr	0-5	6	79	15	8	82	10
	5-15	14	73	13	13	78	9
Y+pe	0-5	14	76	10	28	66	6
	5-15	14	78	8	21	73	6

Utilizando distintos modos de muestreo del suelo, de fraccionamiento de los agregados y de presentación de los datos obtenidos, existe coincidencia en que el rango de tamaño situado entre 250 y 500 μm constituye un límite para separar en este suelo entre agregados mayores y menores. Debe notarse también que la distribución de agregados obtenida mediante tamizado de muestras colectadas en los perfiles y en los muestreos superficiales de los tratamientos, concuerda con los datos descriptivos de la macroestructura de campo referida en la **Tabla 1** . Además, dado que los tres tratamientos corresponden a situaciones sucesivas, puede decirse que el laboreo del suelo ha provocado primero la disminución de tamaño de los agregados, y que la implantación posterior del Pasto Elefante ha generado un proceso de re-agregación en los tamaños mayores. También, la mayor proporción de macroagregados en Y+pe luego del tamizado en húmedo, indica que además de su regeneración, los mismos han adquirido una mayor estabilidad incluso que en el suelo virgen bajo selva.

Estos resultados indican además que en este Ultisol los factores de agregación y de estabilización de la estructura son más variados que para el caso de los Oxisoles y de los Molisoles-Alfisolos estudiados por Oades & Waters (1991). Por un lado debe notarse que este suelo tiene entre 14-16% de hierro libre entre formas cristalinas y amorfas, lo que constituiría un agente importante de agregación tal como ocurre en los Oxisoles. Una cantidad considerable de trabajos en suelos diversos relacionan el contenido de óxidos de hierro libre, en particular las formas no cristalinas, con algún grado de estabilidad de los agregados, aunque no resulta claro qué minerales, qué fracciones o mediante qué mecanismos los compuestos de hierro contribuyen a la unión de las partículas (Goldberg, 1989; Schwertmann & Taylor, 1989; Schwertmann, 1990). También los óxidos de aluminio incrementan la floculación de arcillas, pudiendo ser no solo más efectivos que los óxidos de Fe sino también activos en un rango más amplio de pH (Goldberg & Glaubig, 1987). Sin embargo, es claro que la materia orgánica juega en este Ultisol un rol relevante en los procesos de agregación y de distribución de agregados en diversos tamaños, tal como ocurre en los Molisoles y Alfisolos. También Desphande *et al.* (1964; 1968) señalaron que el hierro puede jugar un rol en la estabilidad de micro y macroagregados en suelos lateríticos, aunque en los macroagregados los materiales orgánicos ejercerían un efecto de mayor importancia que el hierro.

De manera coincidente, los procesos de modificación del tamaño de los agregados en los diferentes tratamientos aquí estudiados pueden relacionarse con los cambios en el contenido total de materia orgánica en el suelo y con la distribución de la misma en las distintas fracciones de agregados. En estos mismos tratamientos Piccolo *et al.* (1998) encontraron por un lado que en los sitios de Selva y de Yermal convencional (Yr) los microagregados, y en particular los de menor tamaño (menores de 100 μm) tenían un contenido mayor de CO que los macroagregados. No obstante el contenido de CO en los microagregados del tratamiento Yr fue mucho menor (20,9%) que en los microagregados del suelo de Selva (47,2 %). Por el contrario en la calle del Yermal con Pasto Elefante el contenido de CO fue similar en todos los tamaños de agregados (alrededor de un 25%). Por otro lado, relacionando el contenido de CO con la proporción de cada fracción de agregados en el suelo (dado que es mucho mayor la proporción de mega+macroagregados que la de microagregados, ver **Tablas 6** , **7**  y **8** ) son los agregados de mayor tamaño los que concentran la mayor cantidad de CO del suelo en todos los tratamientos. En síntesis, el tratamiento con Pasto Elefante condujo a un incremento del contenido de CO en todos los tamaños de agregados pero este fue más importante en los macroagregados.



En estos mismos ensayos Piccolo (1996) y Piccolo *et al.* (1996) determinaron la proporción de carbono orgánico de ácidos húmicos (COH) y de ácido fúlvicos (COF) respecto al CO total. La mayor re-






lación COH/COF se encontró en el suelo de Selva (1,58) y la menor en el Yermal laboreado (0,90); por el contrario en el Yermal con Pasto Elefante se revirtió esta evolución encontrándose valores intermedios de la relación COH/COF (1,39). Estas modificaciones en la proporción de ácidos orgánicos pueden relacionarse con la modificación paralela señalada más arriba por Saragovi *et al.* (1997) y Morrás *et al.* (1998) en la mineralogía del hierro (relación goethita/hematita) de estos tratamientos. De acuerdo a Kodama & Schnitzer (1977) uno de los factores más importantes que gobiernan la cristalización de óxidos de Fe a partir de ferrihidrita es la concentración de ácidos fúlvicos, su incremento favoreciendo la cristalización de hematita en desmedro de la goethita. En consecuencia, las nuevas condiciones físicas y químicas producidas en Yr que llevan a un incremento de ácidos fúlvicos contribuirían también a aumentar la proporción de hematita bien cristalizada, en tanto en el tratamiento Y+pe aumentaría relativamente la proporción de ferrihidrita y goethita de menor grado de cristalinidad y más efectivas en los procesos de agregación. Así, todos estos resultados que involucran a la evolución de la materia orgánica, y su influencia en componentes inorgánicos del suelo, explicarían también los cambios en la distribución de agregados y en su estabilidad ocurridos en el tratamiento Y+pe respecto al tratamiento Yr. Estudios posteriores de Piccolo (1999) en otros sitios de Misiones y a través de otros parámetros relacionados con la materia orgánica (contenido de CO particulado y de N, P y S) ratificaron esos resultados y el efecto del Pasto Elefante en el incremento del contenido y calidad de la materia orgánica de los agregados del suelo, en particular en los agregados de mayor tamaño.

Análisis morfológicos de agregados mediante microscopía

Generalmente los trabajos sobre estructura edáfica consideran específicamente la evolución de tamaño de los agregados y los agentes de estabilización, no así eventuales modificaciones morfológicas de los agregados del suelo frente a distintas situaciones de manejo. De hecho, los estudios morfológicos de agregados obtenidos por tamizado de suelos sometidos a diversos manejos han sido internacionalmente poco explorados, pudiéndose citar en nuestro país los trabajos de Bonel *et al.* (2005), Kraemer *et al.* (2017) y Kraemer & Morrás (2017) referidos al impacto de la siembra directa en los macroagregados de suelos pampeanos y el trabajo de Alvarez *et al.* (2008) sobre agregados de suelos del SE bonaerense con distintos usos.

Con el propósito de obtener información más detallada respecto a las modificaciones microestructurales derivadas de los manejos culturales en este Ultisol, se efectuaron en los tres tratamientos estudios microscópicos comparativos mediante diversas técnicas. Por un lado se efectuaron observaciones por microscopía óptica estereoscópica en luz reflejada y por microscopía electrónica de barrido en las caras externas e internas de los agregados obtenidos por tamizado en seco del horizonte A de cada uno de los lotes estudiados. Para este fin se utilizaron los agregados de tamaño mayor a 8 mm y los microagregados de la fracción entre 100-250 μm (Morrás *et al.*, 1999).

El análisis microscópico de la fracción de agregados mayores a 8 mm del horizonte A de Selva evidencia una morfología de bloques subangulares irregulares, con bordes y superficies rugosas, y en los que se aprecian abundantes cavidades profundas y canales. Al fracturar estos agregados, se constatan pocas diferencias entre las caras externas e internas **Figura 2A**  y **D** . En su interior se distinguen también agregados de menor tamaño que componen estos macroagregados. Este hecho concuerda con el modelo de agregación propuesto por Tisdall y Oades (1982), quienes sostienen que los macroagregados están compuestos por microagregados que son capaces de resistir la acción disruptiva del cultivo del suelo. A diferencia del suelo de

Selva, los macroagregados del horizonte A del Yermal son bloques subangulares notoriamente redondeados y gránulos gruesos con la superficie alisada. La porosidad de estas unidades estructurales es mucho menor que en los agregados de Selva, tanto en su interior **Figura 2B** *1 y **E** *1 como en la superficie externa. Por su parte, en los agregados de la situación Y+pe se observa un incremento de la rugosidad de la superficie y un incremento de la meso y macroporosidad constituida por canales y cavidades, respecto a la situación de Yermal **Figura 2C** *1 y **F** *1. También pueden distinguirse en su interior agregados primarios de menor tamaño. Por otro lado, en el interior de todos los macroagregados se observan fragmentos de raíces, los cuales son más abundantes en el tratamiento con Pasto Elefante **Figura 2C** *1.

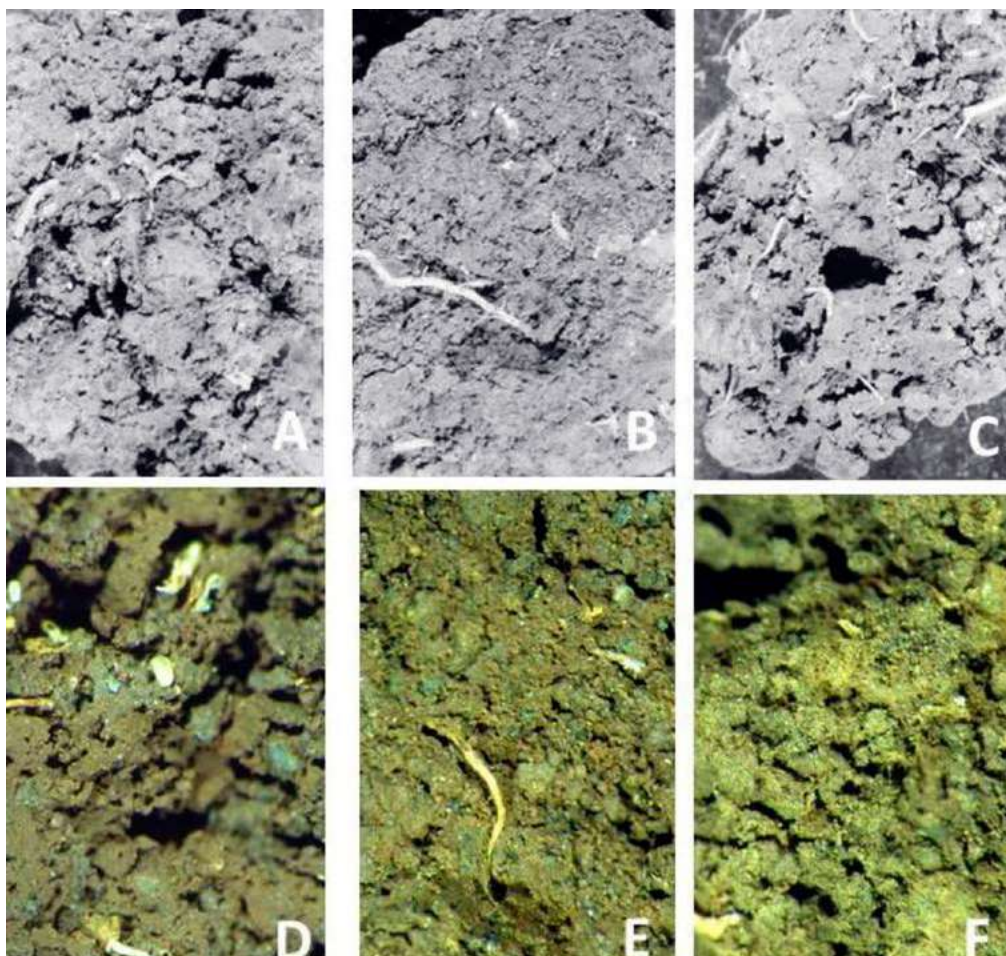


Figura 2: Morfología interna de macroagregados (>8 mm) obtenidos por tamizado en seco y observados por microscopía estereoscópica en dos niveles de magnificación: (A, B, C: objetivo 1,0 x; ancho de la imagen 7,5 mm. C, D, E: objetivo 2,0 x; ancho de la imagen 3,7 mm). **A:** morfología interna de macroagregado de suelo de Selva; notar la abundancia de macroporos. **B:** morfología interna de macroagregado del tratamiento Yr; debe notarse su carácter denso, escasamente poroso; puede también observarse parcialmente la morfología externa esferoidal y la superficie alisada. **C:** morfología interna de macroagregado del tratamiento Y+pe con gran volumen de macroporos; puede también constatarse su morfología externa irregular y la mayor cantidad de raíces. **D:** detalle de la morfología interna de macroagregado de Selva. **E:** idem de macroagregado del tratamiento Yr. **F:** idem de macroagregado del tratamiento Y+pe.

Figure 2: Internal morphology of macroaggregates (> 8 mm) obtained by dry sieving and observed by stereoscopic microscopy at two levels of magnification (A, B, C: objective 1.0 x, C, D, E: objective 2.0 x). **A:** internal morphology of a macroaggregate of the forest soil; notice the abundance of macropores. **B:** internal morphology of a macroaggregate of the Yr treatment; its dense, sparsely porous character can be noted; spherical morphology and smoothed surface can also be partially observed. **C:** internal morphology of a macroaggregate of the Y+pe treatment, with a large volume of macropores; notice its irregular external morphology and the greatest number of roots. **D:** detail of the internal morphology of a macroaggregate from the forest soil. **E:** idem, macro-aggregate from the Yr treatment. **F:** idem, macroaggregate from the Y+pe treatment.

La observación por microscopía electrónica de los microagregados de la fracción 100-250 μm muestra que en el horizonte superficial del suelo de Selva estos microagregados son irregulares, subangulares, algunos prolados, con superficie fuertemente rugosa y abundante porosidad **Figura 3A** y **D**. Contrariamente, los microagregados correspondientes al suelo del Yermal son gránulos aproximadamente equidimensionales, redondeados y con la superficie alisada **Figura 3B** y **E**. Por su parte los microagregados del suelo con Pasto Elefante (Y+pe) se presentan como gránulos equidimensionales a prolados subangulares, con bordes ondulados y caras onduladas rugosas **Figura 3C** y **D**. Estas características morfológicas resultan así intermedias entre las presentadas por los microagregados de las situaciones de Yermal laboreado y de la Selva, aunque más próximas a las del suelo prístino de Selva.

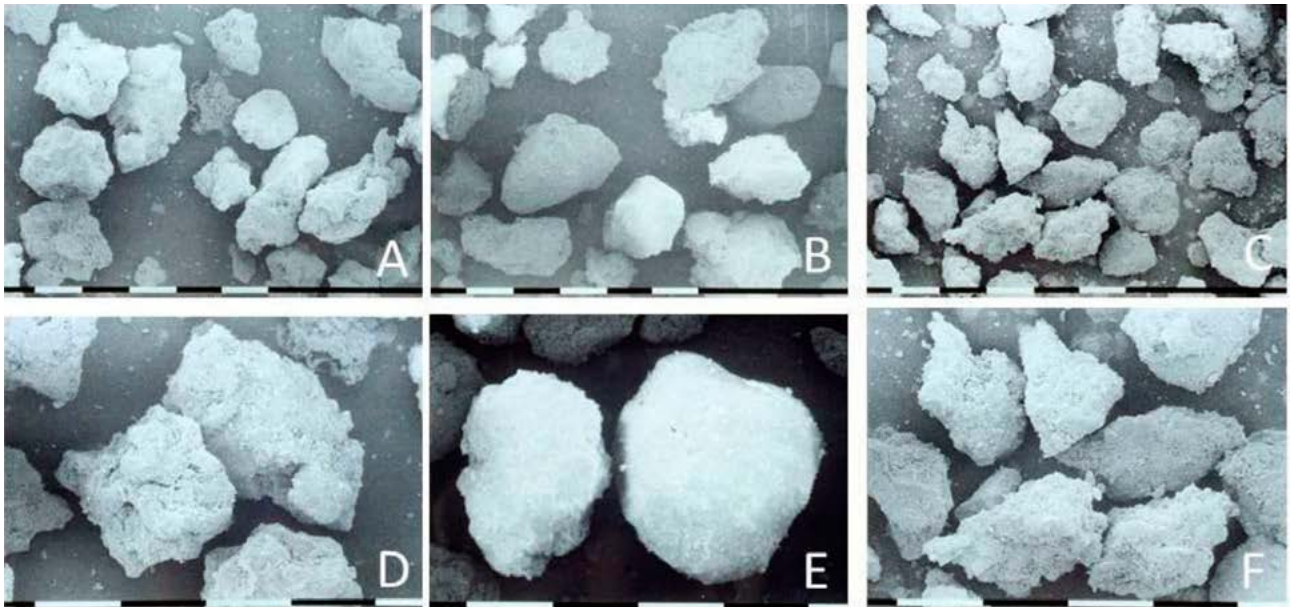


Figura 3: Morfología de microagregados (100-250 μm) de los horizontes A de las tres situaciones estudiadas, observados en microscopía electrónica de barrido (MEB) a dos niveles de magnificación; los segmentos blancos horizontales representan 100 μm de longitud. **A-D:** agregados del suelo de Selva. **B-E:** agregados del Yermal con laboreo del suelo. **C-F:** agregados del Yermal con Pasto Elefante.

Figure 3: Morphology of microaggregates (100-250 μm) of the A horizons of the three situations studied, observed in scanning electron microscopy (SEM) at two magnification levels; The horizontal white segments represent 100 μm in length. **A-D:** aggregates of the forest soil. **B-E:** aggregates from tilled soil (Yr). **C-F:** aggregates from the plot with Elephant grass.




En síntesis, el análisis morfológico de macro y microagregados de este Ultisol revela que en el horizonte superficial del suelo de Selva estos son anfractuosos y fuertemente porosos. Por el contrario, en el Yermal con laboreo del suelo (Yr) tanto macro como microagregados han sufrido cambios morfológicos similares, transformándose en unidades esferoidales y compactas. Esta modificación morfológica resultaría de las presiones ejercidas por los implementos de labor y el roce mutuo generando un proceso de amasado de los agregados constituidos por un material fuertemente arcilloso. Por otro lado, resulta notable la rápida modificación morfológica tanto de los macro como de los microagregados en el tratamiento del suelo con Pasto Elefante. En este caso el incremento de la porosidad y anfractuosidad respecto a los agregados del suelo laboreado (Yr) sería consecuencia de las presiones ejercidas por las raíces de la gramínea, de la actividad agregante de la mayor proporción de materia orgánica efectivamente constatada en este tratamiento y verosimilmente de un incremento de la actividad biológica general, tanto de la microbiota como de la fauna del suelo. En consecuencia, y como también han señalado Alvarez *et al.*

(2008) y Kraemer *et al.* (2017) para suelos pampeanos, la morfología y la rugosidad de agregados también podrían ser incluidos como indicadores físicos de calidad y salud del suelo en función del manejo.

Análisis de la microestructura

En muestras no disturbadas tomadas con cajas de Kubiena, correspondientes a los horizontes A y BA de las tres situaciones (S, Yr, Y+pe) se efectuaron observaciones morfológicas de la estructura mediante microscopía óptica estereoscópica. Dichas muestras fueron luego impregnadas con resina poliéster y se prepararon cortes delgados que fueron analizados mediante microscopía óptica de polarización.

Microscopía estereoscópica de muestras no disturbadas

El horizonte A del suelo virgen bajo Selva nativa (S) presenta agregados subangulares irregulares y rugosos, en parte de morfología alargada (prolada); la porosidad entre agregados es importante, y se halla constituida por poros de empaquetamiento grandes e interconectados **Figura 4A** . Por el contrario, en el horizonte superficial del suelo en el tratamiento Yr los gránulos se presentan notoriamente redondeados y más pequeños que en el caso anterior; la porosidad total es menor y el tamaño de los poros es menor que en S **Figura 4B** . Por su parte en la situación Y+pe los agregados se observan más irregulares, en gran parte con la apariencia de individuos muy pequeños unidos entre sí en otros agregados de mayor tamaño. A diferencia de las otras situaciones, en este caso son comunes los fragmentos de raíces. Los poros predominantes son de empaquetamiento y su proporción y tamaño se asemejan al tratamiento Yr **Figura 4C** .

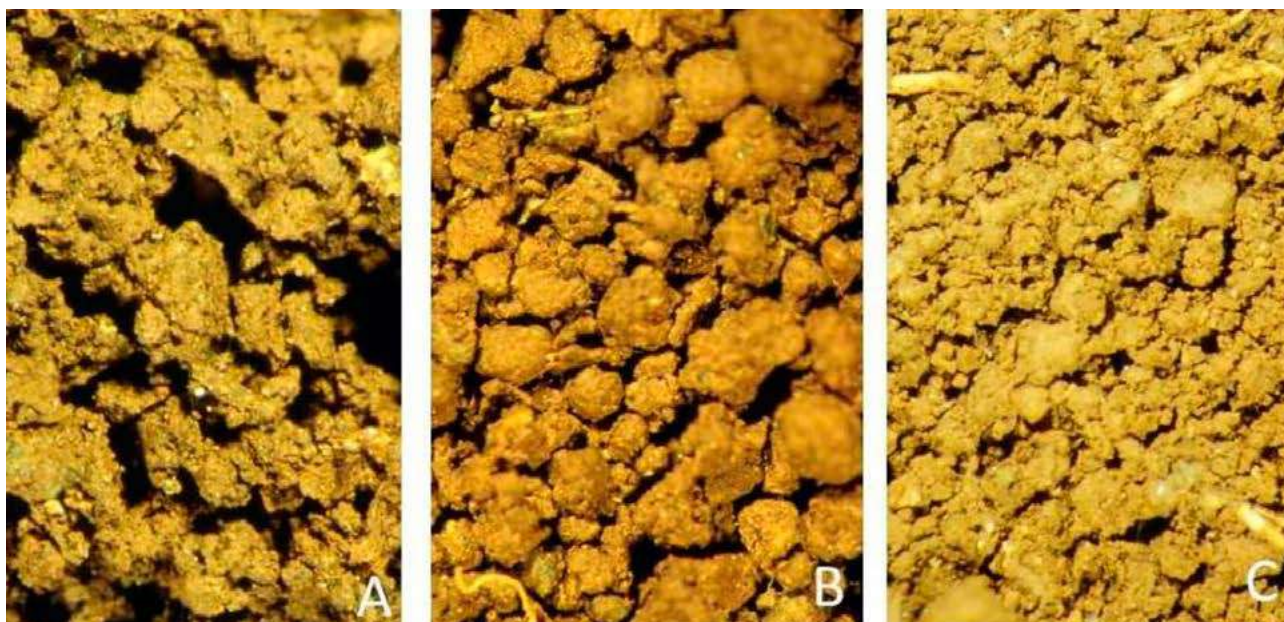



Figura 4: Muestras no disturbadas del horizonte A de los tres tratamientos estudiados, observadas mediante microscopía estereoscópica. Magnificación: objetivo 5,0x; ancho de la imagen 1,5 mm. **A:** horizonte A del suelo de Selva. **B:** horizonte Ap del tratamiento Yr. **C:** horizonte Ap del tratamiento Y+pe.

Figure 4: Undisturbed samples of the A horizon of the three treatments studied, observed by stereoscopic microscopy. Magnification: objective 5.0x. **A:** A horizon of the forest soil. **B:** Ap horizon of the Yr treatment. **C:** Ap horizon of the Y+pe treatment.

En cuanto a los horizontes BA, en el suelo de Selva (S) se presentan agregados subangulares y los poros observables de mayor tamaño son fisuras subverticales entre agregados **Figura 5A** . Por el

contrario, en el suelo de Yermal este horizonte se presenta más denso, con escasa porosidad y poros de menor tamaño que en el caso anterior; también se observan gránulos redondeados similares a los horizontes Ap, lo que indica también un proceso de mezcla de material de ambos horizontes además del proceso de compactación **Figura 5B** ©. Finalmente, en el tratamiento Y+pe, si bien hay alguna semejanza con el caso anterior tal como la presencia de pequeños gránulos característicos del horizonte superficial, aquí la porosidad es más evidente y se destacan en particular los macroporos tubulares asociados con una mayor proporción de raíces **Figura 5C** ©. Si bien las muestras descritas han sido tomadas en la parte media de los horizontes BA, entre 15-25 cm de profundidad, se pueden también constatar diferencias microestructurales entre las tres situaciones derivadas de los diferentes manejos.

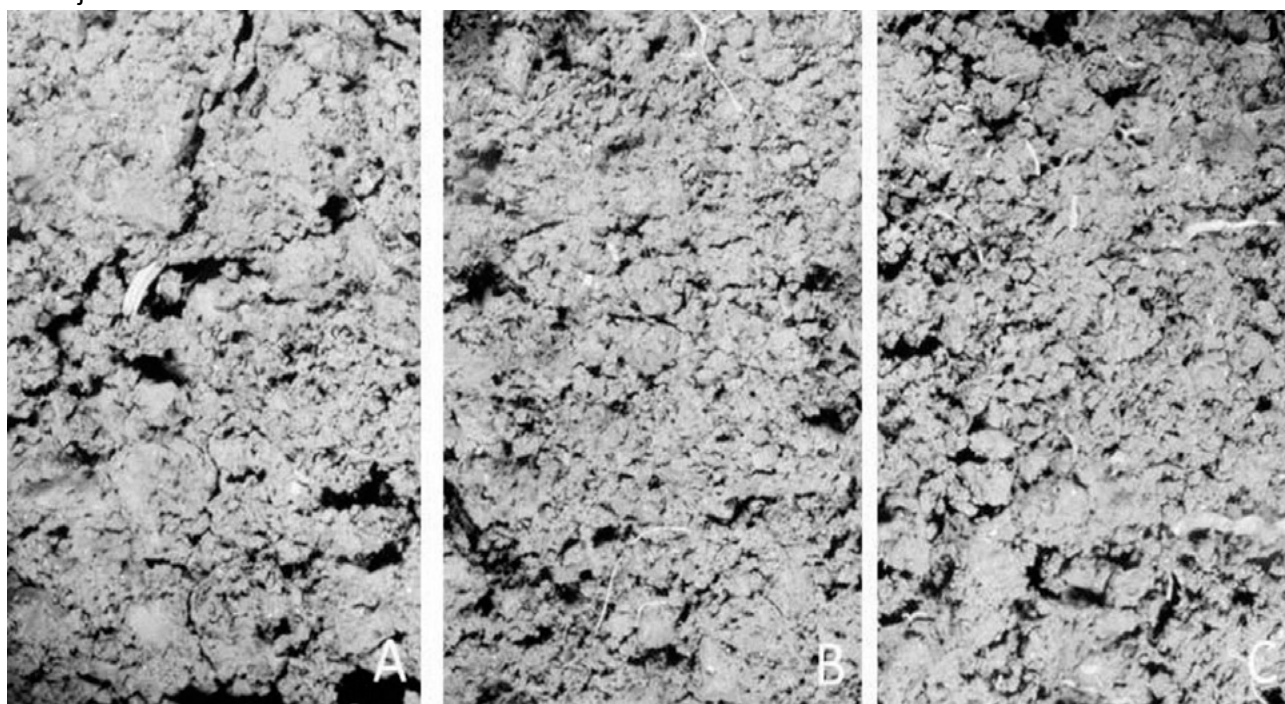


Figura 5: Muestras no disturbadas del horizonte BA (profundidad 15-25 cm) de los tres tratamientos estudiados, observadas mediante microscopía estereoscópica. Magnificación: objetivo 0,63x; ancho de la imagen 12 mm.

A: horizonte BA del suelo de Selva. **B:** horizonte BA del tratamiento Yr. **C:** horizonte BA del tratamiento Y+pe.

Figure 5: Undisturbed samples of the BA horizon (depth between 15-25 cm) of the three treatments studied, observed by stereoscopic microscopy. Magnification: objective 0.63 x. **A:** BA horizon of the forest soil.

B: BA horizon of the Yr treatment. **C:** BA horizon of the Y+pe treatment.

El proceso de compactación del suelo y el contraste estructural entre horizontes resulta claramente evidente en las muestras tomadas en el contacto abrupto entre los horizontes A y BAd de la situación de Yermal laboreado (Yr) **Figura 6** ©. En este caso, los agregados equidimensionales del horizonte A tienen morfología de bloques angulares y subangulares muy pequeños **Figura 6A** ©. Por el contrario, la capa compactada subyacente presenta agregados subangulares grandes fuertemente unidos, generando una masa densa de escasa porosidad. En la **Figura 6B** © se puede apreciar además el efecto restrictivo de la compactación en el desarrollo radicular, dado que se ha capturado una raíz con orientación horizontal que no ha podido penetrar la capa compactada. En la **Figura 6C** © se observa esta misma muestra en corte delgado y mediante microscopía de transmisión, donde por un lado se aprecia el contraste microestructural entre el horizonte superficial y la capa compactada, y por otro el tejido vegetal de la raíz con disposición horizontal en el límite entre ambos.

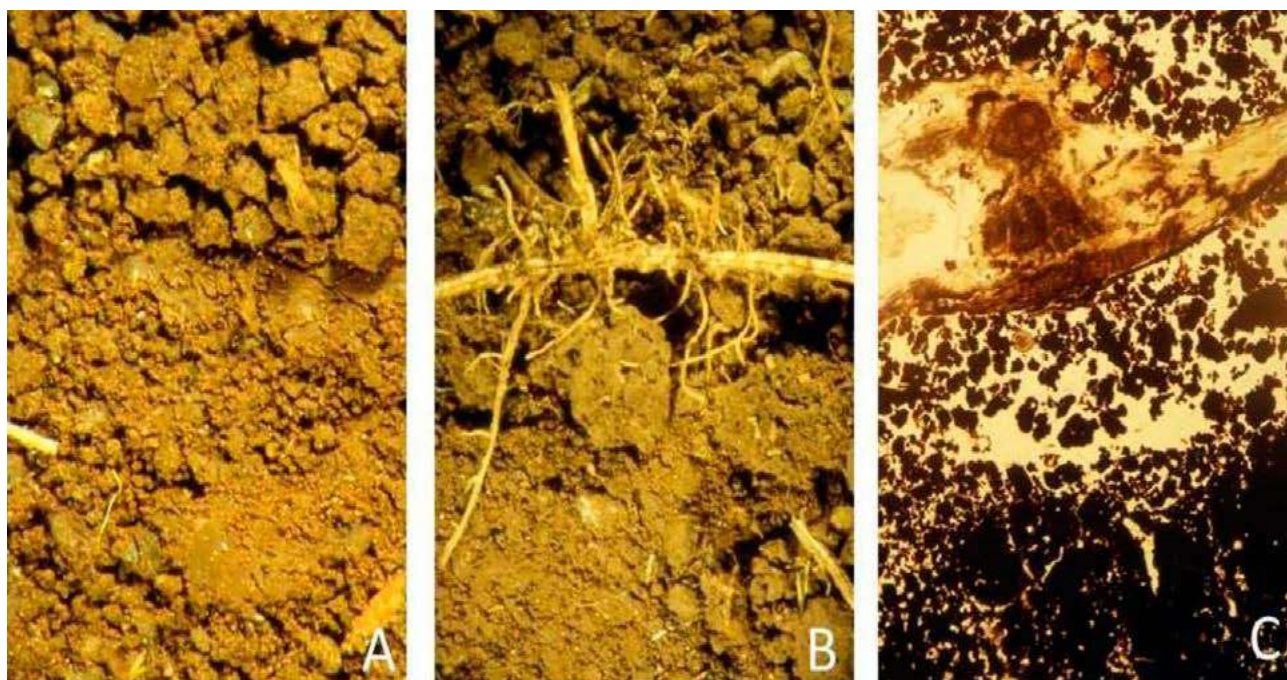


Figura 6: Tratamiento Yr, muestras no disturbadas. Contacto entre el horizonte Ap y la capa compactada ABd. **A:** Se aprecian las diferencias microestructurales en el contacto de horizontes. Microscopía estereoscópica; objetivo 0,63x; ancho de la imagen 12 mm. **B:** Se observa una raíz de desarrollo horizontal en el límite con la capa compactada. Microscopía estereoscópica; objetivo 2,0x; ancho de la imagen 3,7 mm. **C:** Límite abrupto entre horizontes y raíz vegetal en el techo de la capa compactada. Muestra en corte delgado; microscopía óptica de transmisión; objetivo 0,63x; ancho de la imagen 12 mm.

Figure 6: Undisturbed samples from the Yr treatment. Contact between the Ap horizon and the ABd compacted layer. **A:** microstructural differences at the limit between horizons are appreciated. Stereoscopic microscopy; objective 0.63x. **B:** a root with horizontal development in the limit with the compacted layer. Stereoscopic microscopy; objective 2.0x. **C:** abrupt boundary between horizons and a horizontal root at the top of the compacted layer. Soil thin section; transmission optical microscopy; objective 0.63x.

Microscopía óptica de cortes delgados

Los análisis micromorfológicos en corte delgado permiten diferenciar claramente la morfología de agregados y de poros entre las tres situaciones estudiadas. El horizonte A del suelo de Selva presenta pequeños bloques subangulares y gránulos irregulares, con superficies rugosas **Figura 7A** y **D**. La porosidad entre agregados es importante, constituida principalmente por poros de empaquetamiento compuesto, y en menor medida por fisuras, algunas de tamaño grande y dirección subhorizontal. En el tratamiento Yr, y en coincidencia con lo observado por episcopía en la **Figura 4B**, la mayor parte de los gránulos –tanto los de mayor tamaño como los más pequeños– tienen una morfología esferoidal, y los poros son predominantemente de empaquetamiento **Figura 7B** y **E**.

En este horizonte Ap la microestructura es de tipo granular, con gránulos y pequeños bloques con muy escasa o nula porosidad. Por el contrario, en la situación con Pasto Elefante (Y+pe) los agregados del horizonte Ap muestran una morfología más heterogénea: algunos son redondeados, otros subangulares; en este caso aparecen también como distintivos agregados muy irregulares y porosos (grumos) que parecen ser el resultado de la agregación de gránulos más pequeños **Figura 7C** y **D**. En este último caso la microestructura ha evolucionado de granular a incipientemente migajosa.

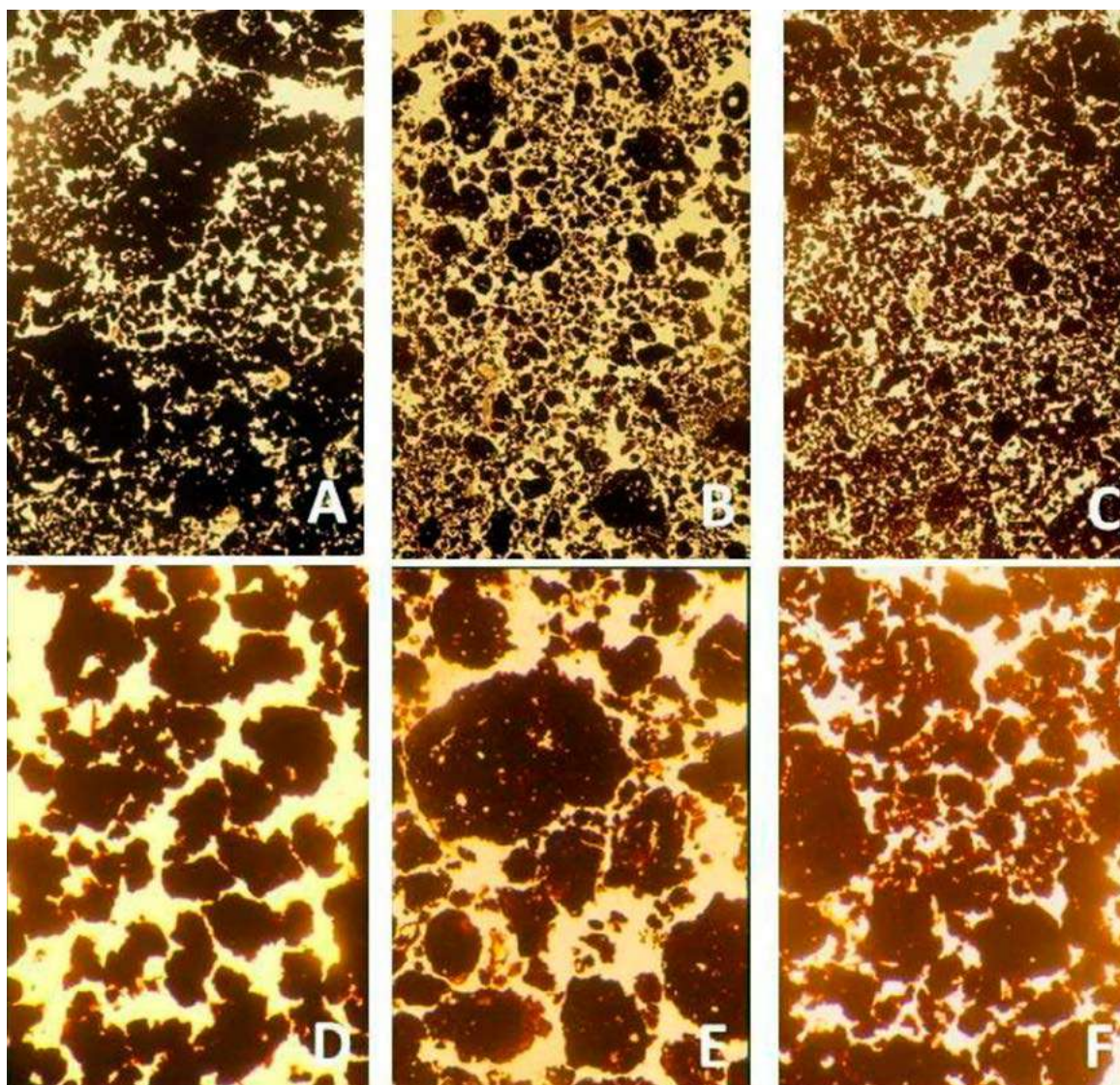



Figura 7: Microestructura del horizonte A de cada uno de los tratamientos, observada en corte delgado. Microscopía óptica de transmisión, en dos niveles de magnificación (A, B, C: objetivo 0,63x; ancho de la imagen 12 mm. C, D, E: objetivo 2,5x; ancho de la imagen 3 mm). **A-D:** suelo de Selva (S). **B-E:** Yerbalo con laboreo del suelo (Yr). **C-F:** Yerbalo con Pasto Elefante (Y+pe).

Figure 7: Microstructure of the A horizon of each of the treatments, observed in thin section. Transmission optical microscopy, in two levels of magnification (A, B, C: objective 0.63x; frame width 12 mm. C, D, E: objective 2.5x; frame width 3 mm). **A-D:** forest soil (S). **B-E:** Yerba Mate plot with soil tillage (Yr). **C-F:** Yerba mate with Elephant grass (Y + pe).

En el horizonte BA del suelo S la microscopía de cortes delgados muestra claramente la presencia de agregados subangulares a angulares, en tanto el área poral es importante y se halla constituida por huecos de empaquetamiento y por fisuras **Figura 8A** (1). Por el contrario, en Yr la masa basal del horizonte BA se presenta densa, con menor proporción de poros; entre estos predominan las cavidades, acompañadas de algunas fisuras finas y rectas **Figura 8B** (2). Resulta interesante mencionar que en la masa basal de este horizonte se presentan concentraciones difusas de óxidos de hierro, no observadas en las otras situaciones, lo que estaría indicando un cierto grado de modificación de las condiciones de óxido-reducción como consecuencia de la compactación, lo que se relacionaría con algunos cambios constatados en la mineralogía del hierro (Morrás *et al.*, 1998). Por su parte, el horizonte BA del tratamien-

to con Pasto Elefante (Y+pe) muestra una microestructura claramente diferenciada de las dos anteriores **Figura 8C** ; en este caso además del incremento de porosidad respecto a Yr, es notoria la heterogeneidad en la morfología de poros; en este caso las fisuras aumentan en proporción y en gran parte se presentan como fisuras en zig-zag, en tanto se observan también algunos canales pequeños. También pueden observarse sectores de coloración más oscura que reflejan la mezcla con fracción coloidal orgánica como consecuencia de la humificación de la materia orgánica aportada por el Pasto Elefante.

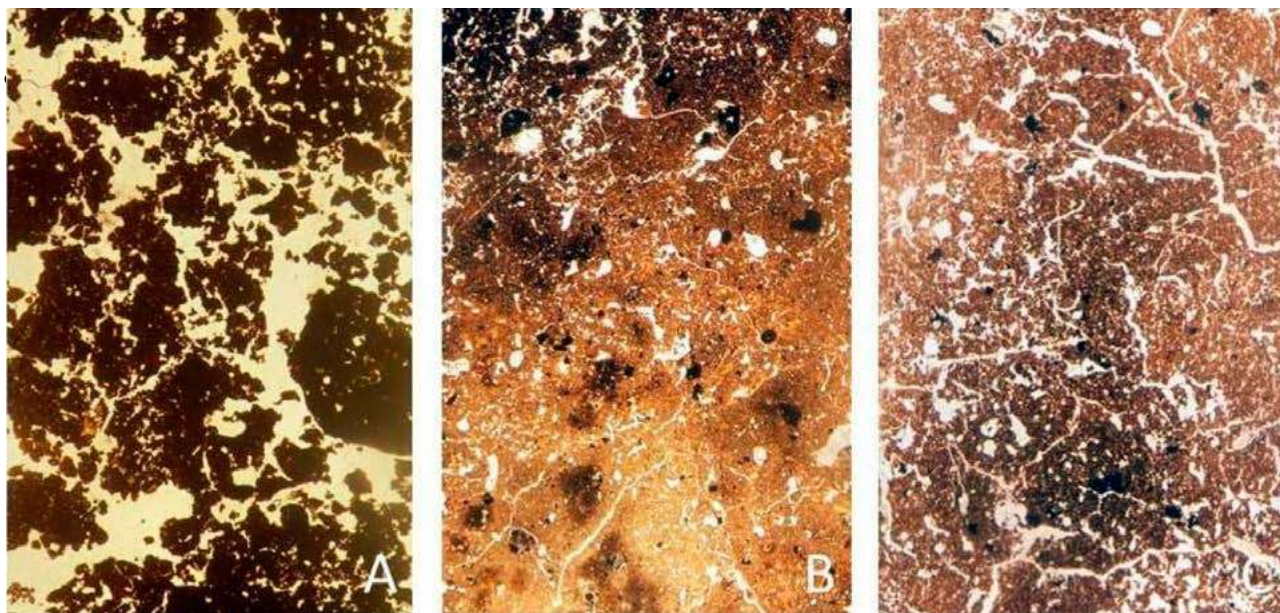







Figura 8: Microestructura del horizonte BA de cada uno de los tratamientos, observada en corte delgado. Microscopía óptica de transmisión; magnificación en A: objetivo 0,8x; ancho de la imagen 9,4 mm. Magnificación en B y C: objetivo 0,63x; ancho de la imagen 12 mm.

A: suelo de Selva (S). **B:** Yrba Mate con laboreo del suelo (Yr). **C:** Yrba Mate con Pasto Elefante (Y+pe).

Figure 8: Microstructure of the BA horizon of each of the treatments, observed in thin section. Transmission optical microscopy; magnification in A: objective 0.8 x; magnification in B and C: objective 0.63x. **A:** forest soil (S). **B:** Yerba Mate plot with soil tillage (Yr). **C:** Yerba Mate with Elephant grass (Y + pe).

El análisis micromorfométrico de la porosidad en los cortes delgados ha permitido también obtener interesante información respecto a la evolución de la misma en relación con el manejo. Con el fin de poder relacionar los datos obtenidos por distintas técnicas, en los gráficos de barras de la **Figura 9A**  y **B**  se presentan primeramente los porcentajes de porosidad total y de macroporosidad obtenidos de manera indirecta por el método de desorción de agua **Tabla 4** *1. Por otro lado, en la **Figura 9C**  y **D**  se representa la tipología morfológica de la macroporosidad de los horizontes A y BA de los tres tratamientos de acuerdo a los análisis realizados por microscopía óptica. Así, en el horizonte A del suelo de Selva (S) la mayor parte de los macroporos son poros de empaquetamiento compuesto, seguidos en orden decreciente por cavidades, fisuras y una mínima proporción de canales. En el horizonte Ap de Yr la porosidad es mayoritariamente de poros de empaquetamiento, habiendo claramente desaparecido los otros tipos de poros. Por el contrario en Y+pe la porosidad cambia notablemente: aquí disminuye la proporción de poros de empaquetamiento, reaparece una pequeña proporción de cavidades y de manera distintiva aumenta la proporción de canales, los que son casi inexistentes en los otros tratamientos.

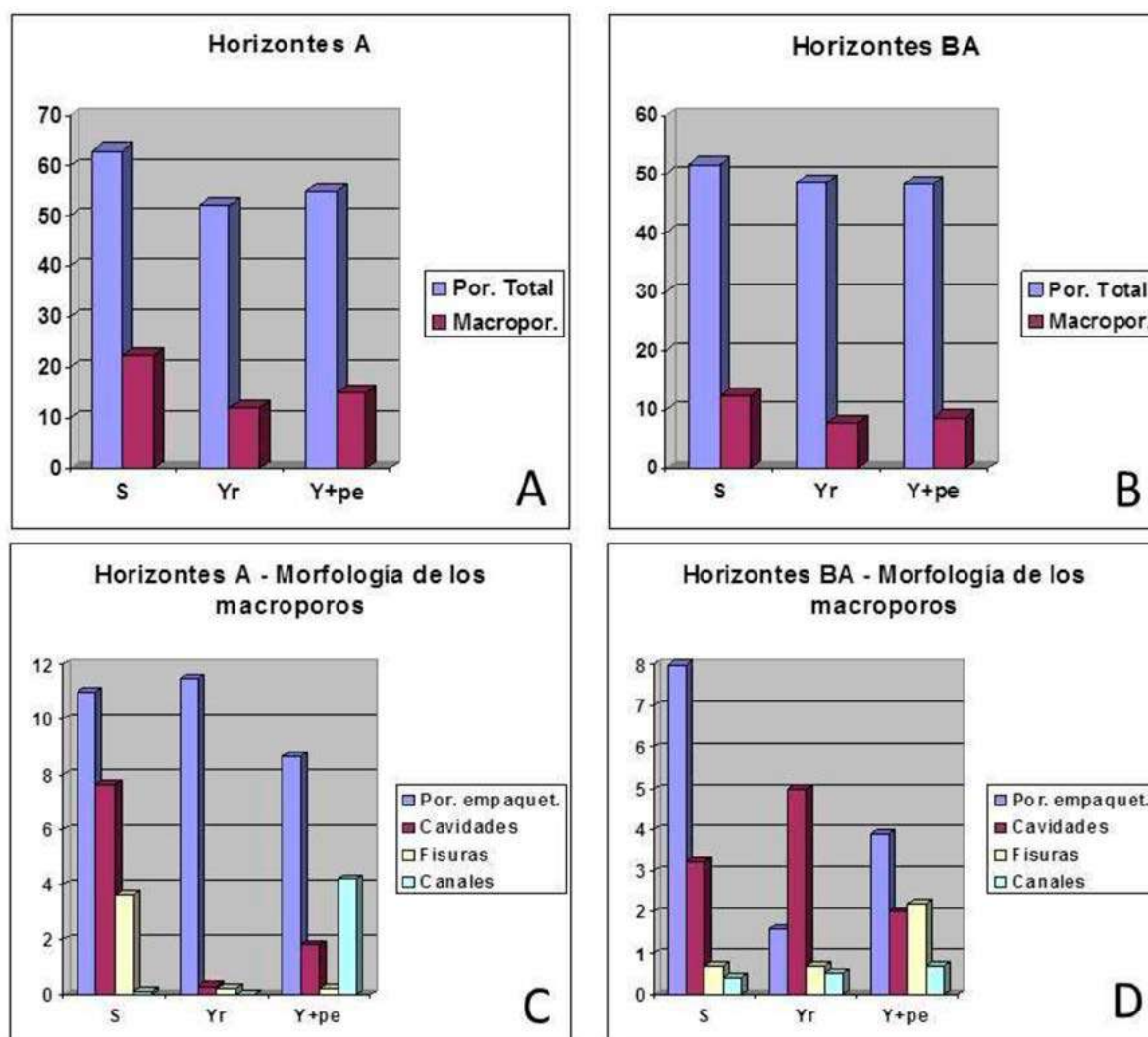


Figura 9: Porosidad total, macroporos y morfología de los macroporos en los tres tratamientos estudiados.


A: porosidad total y proporción de macroporos ($>60\ \mu\text{m}$) expresados en % del volumen del suelo total del horizonte superficial; datos obtenidos por desorción de agua a presión. **B:** ídem para el horizonte BA.

C: tipología de los macroporos ($>60\ \mu\text{m}$) del horizonte A de acuerdo al análisis micromorfométrico por microscopía óptica de polarización. La proporción de macroporos se halla referida al valor total obtenido por desorción de agua y representado en A. **D:** ídem para el horizonte BA de los tres tratamientos.

Figure 9: Total porosity, macropores and morphology of the macropores in the three treatments studied.

A: total porosity and proportion of macropores ($>60\ \mu\text{m}$) expressed in % of the total volume of the surface horizon; data obtained by desorption of water under pressure. **B:** ídem for the BA horizon. **C:** typology of the macropores ($>60\ \mu\text{m}$) of the A horizon according to the micromorphometric analysis by optical polarization microscopy. The proportion of macropores is related to the total value obtained by desorption of water and represented in A.

D: ídem for the BA horizon of the three treatments.

La micromorfometría de los horizontes BA **Figura 9D**  revela también claramente la diferenciación microestructural entre los distintos manejos. En el caso del suelo virgen (S) predominan los poros de empaquetamiento y las cavidades. En el caso del horizonte compactado en el Yerbial laboreado (Yr) predominan las cavidades. Por el contrario en el tratamiento con Pasto Elefante (Y+pe) la morfología de poros se presenta más equilibrada; en este caso las fisuras equiparan la proporción de cavidades, y por otro lado aumenta ligeramente la cantidad de poros tubulares.

En síntesis, los estudios en muestras no disturbadas realizados tanto por episcopía como en cortes delgados, permiten obtener una clara apreciación de las características de la porosidad y de la agregación en cada tratamiento y consecuentemente de la evolución microestructural del suelo relacio-

nada con el manejo. Por un lado estos análisis confirman los cambios morfológicos de los agregados tal como fueron observados en los agregados sueltos obtenidos por tamizado. Por otro lado, y de manera específica, los análisis de muestras no disturbadas muestran claramente la compactación subsuperficial generada por el laboreo del suelo en los Yerbales (situación Yr) y su rol restrictivo para el desarrollo radicular. Además estos análisis muestran los cambios morfológicos y el proceso de descompactación biológica que han comenzado a ocurrir luego de la implantación de Pasto Elefante en las calles del Yermal (tratamiento Y+pe). Finalmente, los análisis micromorfométricos han permitido caracterizar cuantitativamente la tipología de los poros de cada situación, pudiéndose en consecuencia apreciar claramente la evolución morfológica de la porosidad en función del manejo.

■ CONCLUSIONES

Los estudios realizados mediante diversas técnicas analíticas sobre los horizontes A y BA de un Ultisol de Misiones implantado con Yerba Mate y con control mecánico de malezas han mostrado notorios cambios respecto al suelo virgen con vegetación de selva, que implican la pérdida de fertilidad y una clara degradación de la estructura original. Por el contrario, el reemplazo de este procedimiento por la implantación entre las líneas de plantas de un abono verde con gran producción de biomasa, en este caso Pasto Elefante, ha producido en el breve plazo de seis años la mejora de diversos parámetros químicos y una evidente reorganización estructural del suelo.

En el suelo del Yermal con manejo convencional (Yr) la degradación estructural se manifiesta por la disminución del espesor del horizonte Ap y por la compactación subsuperficial en el techo del horizonte BA, la que se evidencia en la restricción para el desarrollo de raíces. También, en este tratamiento se observan pérdidas de materia orgánica y arcilla, así como disminución en parámetros asociados tales como la capacidad de intercambio catiónico y la capacidad de retención de agua. Los análisis microscópicos muestran también en Yr redistribución de sesquióxidos de hierro, lo que reflejaría estados de sobresaturación hídrica y condiciones de anaerobiosis y reducción temporaria en la capa compactada. Estos datos estarían indicando modificaciones en la dinámica del agua como consecuencia de la compactación, las que incluyen sin duda reducción en la permeabilidad, incremento del flujo hipodérmico y la escorrentía, y consecuentemente incremento de los procesos erosivos. En el campo se ha constatado la erosión que ha afectado las interlíneas del yerbal como consecuencia del laboreo con arado de rastra, modificando la estructura en superficie del suelo y generando la capa densa subsuperficial. Por el contrario, en el suelo con implantación posterior de Pasto Elefante (Y+pe) se verifica un incremento de la materia orgánica y un ligero incremento de la CIC y de la retención de agua respecto al Yermal laboreado. Estas modificaciones, así como las que muestran los análisis macro- y micro estructurales, trasuntarían en un mejor comportamiento hidrofísico del suelo con Pasto Elefante. También, y aunque no fue medido, debe considerarse el efecto de la cubierta verde en la disminución del impacto de las gotas de lluvia en el suelo y consecuentemente en la disminución de los procesos de erosión.

Respecto a la porosidad y la agregación, los análisis mediante técnicas convencionales así como los análisis morfológicos a diversas escalas con métodos microscópicos, han puesto en evidencia cambios notorios entre tratamientos. La determinación indirecta de la porosidad en los horizontes A, revela una disminución de la porosidad total y de la proporción de los macroporos en los dos tratamientos con Yerba Mate respecto al suelo de Selva. Sin embargo, en el horizonte Ap del tratamiento Y+pe se

constata un incremento de la porosidad total respecto al tratamiento Yr, que está dada por el incremento de los macroporos, en particular los de mayor tamaño. En cuanto al horizonte BA, la porosidad total presenta escasa diferencia entre el suelo virgen y los lotes cultivados. Sin embargo, en el horizonte BA compactado de Yr la proporción de macroporos disminuye claramente respecto al suelo de Selva en tanto vuelve a aumentar en Y+pe. Por su parte el estudio de la morfología de poros mediante micro-morfometría, muestra que en los horizontes A y BA del suelo de Selva la mayor parte de los macroporos son poros de empaquetamiento compuesto, seguidos en orden decreciente por cavidades, fisuras y una pequeña proporción de canales. Por el contrario, en Yr la porosidad en el horizonte Ap está conformada casi exclusivamente por huecos de empaquetamiento en tanto en el horizonte BA se encuentra constituida mayoritariamente por cavidades. Finalmente, en los horizontes Ap y BA en Y+pe se observa un nuevo cambio en la tipología de poros con disminución de los poros de empaquetamiento y correlativo incremento de canales y fisuras, así como una disminución del grado de compactación del horizonte BA respecto al suelo laboreado

En cuanto a la agregación, los análisis por fraccionamiento muestran que en el suelo laboreado (Yr) se incrementa claramente la proporción de microagregados en el horizonte Ap y en el tope del BA respecto al suelo de Selva; esa disagregación como consecuencia del cultivo se acompaña con una paralela disminución de su estabilidad. Inversamente, la implantación del Pasto Elefante ha generado un proceso de re-agregación del suelo y particularmente un incremento de la estabilidad de los agregados. Por su parte los análisis microscópicos muestran que los agregados irregulares y en parte migajosos del horizonte A del suelo de Selva, se han transformando en el horizonte Ap del suelo laboreado (Yr) en unidades esferoidales de superficie alisada y de interior compacto. Resulta interesante constatar que esta evolución la han sufrido tanto los macro- como los microagregados del suelo. Esta modificación morfológica resultaría de un proceso de amasado por roce de los agregados, que están constituidos por un material fuertemente arcilloso. Por el contrario, en el tratamiento Y+pe, cuya situación de partida sería similar a la del tratamiento Yr, se han constatado modificaciones estructurales en los horizontes Ap y BA que incluyen una mayor anfractuosidad y porosidad tanto de los macro- como de los microagregados.

Estos resultados que muestran cambios microestructurales notorios en función del manejo, sugieren también el interés de incluir la evaluación de la morfología de agregados como un indicador físico de calidad y salud del suelo.

Debe notarse que en comparación con suelos limosos como aquellos que caracterizan la mayor parte de la Argentina, el laboreo durante décadas de este Ultisol característico de Misiones ha producido una destrucción limitada de los macroagregados. Como ocurre con otros suelos tropicales y subtropicales, es claro que el elevado contenido de sesquióxidos libres juega aquí un rol considerable en la estabilidad de la estructura. Los análisis químicos y mineralógicos han puesto también en evidencia transformaciones en los compuestos de hierro en relación con los distintos ambientes físico-químicos generados en cada tratamiento, lo cual podría relacionarse con los cambios en la estabilidad de agregados. Sin embargo, los estudios realizados demuestran que en este suelo la materia orgánica actúa como un importante agente de cohesión, impidiendo en el tratamiento Yr una mayor desintegración de los agregados y favoreciendo en el caso de Y+pe la re-agregación.

En síntesis, estos resultados ponen en evidencia una dinámica sumamente rápida de los procesos edáficos que influyen tanto en la organización como en la composición del suelo; por otro lado permiten

interpretar más claramente la degradación que se produce con el manejo tradicional del yerbal así como la recuperación resultante de manejos alternativos de base biológica.

■ AGRADECIMIENTOS

En el año 1995 el Ing.Agr. Gabriel Piccolo investigador de la EEA-INTA Cerro Azul, me invitó a colaborar en el estudio de suelos de Misiones cultivados con yerba mate, sobre los cuales él había iniciado su tesis de Maestría (FA-UBA) y posteriormente continuó en su tesis de Doctorado (UNS). En aquel momento se sumó al trabajo la Ing. Agr. Edna I. Leiva quien desde Colombia vino a realizar sus estudios de posgrado en la FA-UBA y obtuvo su Maestría analizando diversas propiedades edáficas en los mismos ensayos. Deseo dejar expreso mi agradecimiento a ambos por el mucho trabajo realizado en conjunto, algo de lo cual se presenta sintéticamente en este artículo. Esta colaboración inicial dio pie a la participación posterior de numerosos otros investigadores en diversos estudios sobre este mismo ensayo y en otros proyectos sobre suelos de Misiones.

■ BIBLIOGRAFIA

- Alvarez, F; M Osterrieth; V Bernava & L Montti. 2008. Estabilidad, morfología y rugosidad de agregados de Argiúdoles típicos sometidos a distintos usos: su rol como indicadores de calidad física en suelos de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Ciencia del Suelo*: 26 (2): 115-129.
- Arshad, M; B Lowery & B Grossman. 1996. Physical Tests for Monitoring Soil Quality. En: Doran J & Jones A, eds. *Methods for assessing soil quality*. Madison, WI. p 123-141.
- Barbaro, S & D Sosa. 2015. Influencia del manejo sobre la porosidad en Ultisoles de la Provincia de Misiones y noreste de Corrientes. En: S Barbaro (ed.). *Compendio de trabajos publicados por el Grupo de Recursos Naturales de la EEA-Cerro Azul, 2010-2014*, pp. 9-12
- Bullock, P; N Fedoroff; A Jongerius; G Stoops; T Tursina *et al.* 1985. *Handbook for soil thin sections description*. Waine Research Publications, Wolverhampton, England, 152 p.
- Bonel, B, H Morras & V Bisaro. 2005. Modificaciones de la microestructura y la materia orgánica en un suelo Argiúdol bajo distintas condiciones de cultivo y conservación. *Ciencia del Suelo* 23 (1):1-12.
- Casas, R; R Michelena & S Lacorte. 1983. Relevamiento de propiedades físicas y químicas de suelos sometidos a distintos usos y manejos en el sur de Misiones y NE de Corrientes. INTA, EEA-Misiones, Nota Técnica n° 35, 18 p.
- Causevic, H. 2001. Estudio Mössbauer de un suelo magnético de la provincia de Misiones. Tesis de Licenciatura en Ciencias Físicas; Facultad de Ciencias Exactas y Naturales; Universidad de Buenos Aires, 108 p. y apéndices.
- Corsini, P & A Ferraudó. 1999. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. *Pesq. Agroec. Bras.* 34:289-298.
- Chauvel, A.; M Grimaldi & D Tessier. 1991. Changes in soil pore-space distribution following deforestation and revegetation. An example from the Central Amazon basin, Brazil. *Forest Ecology and Management* 38 (3-4):259-271.
- Cosentino D & C Chenu. 2008. Los microorganismos como controladores de la arquitectura del suelo. En: Fertilidad física de los suelos. M Taboada & C Alvarez, (eds.). Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, pp. 199-237
- Desphande, T; D Greenland & J Quirk. 1964. Role of iron oxides in the bonding of soil particles. *Nature*, 201: 107-108.
- Desphande, T; D Greenland & J Quirk. 1968. Changes in soil properties associated with the removal of iron and aluminum oxides. *Journal of Soil Sci.* 19 (1): 108-122.

- Fernández, R; D Sosa; N Pahr; A von Wallis; S Barbaro & S Albarracín. 2015. Provincia de Misiones. En: El deterioro del ambiente en la Argentina. Tomo 2 (Casas R & G Albarracín (eds.). FECIC-Fundación Ciencia, Educación y Cultura, Buenos Aires, pp. 187-200.
- Fontes, M & S Weed. 1991. Iron oxides in selected brazilian oxisols. I. Mineralogy. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 55: 1143-1149.
- Ganeau, M. 2004. Procedimientos de extracción química selectiva aplicados a la mineralogía de un suelo de la Provincia de Misiones. Tesina de Licenciatura en Química, Universidad Nacional del Sur, Departamento de Química, Bahía Blanca, 46 p.
- Geraldes, W; E Guimaraes; A Cruz & W Bueno. 1996. Influencia do uso nas características físico-químicas de um Latossolo amarelo, textura muito argilosa, Manaus, Am. Solo-suelo. XIII Congresso Latino Americano de Ciência do Solo, Águas de Lindoia, Brasil.
- Goldberg, S. 1989. Interaction of aluminum and iron oxides and clay minerals and their effect on soil physical properties: a review. *Commun. in Soil Sci. Plant Anal.* 20 (11-12): 1181-1207.
- Goldberg, S & R Glaubig. 1987. Effect of saturating cation, pH, and aluminum and iron oxide on the flocculation of kaolinite and montmorillonite. *Clays and Clay Minerals* 35 (3): 220-227.
- Grüner, G. 1955. La erosión en Misiones. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Buenos Aires. Publicación Miscelánea n° 141 (reimpresión), 70 p.
- Kraemer, F; M Soria; M Castiglioni; M Duval; J Galantini & H Morrás. 2017. Morphostructural evaluation of various soils subjected to different use intensity under no-tillage. *Soil Till. Res.* 169:124-137
- Kraemer, F & H Morrás. 2010. Morfología de la compactación en suelos pampeanos cultivados en siembra directa con distintos niveles de intensificación (esta obra).
- Kodama, H & M Schnitzer. 1977. Effect of fulvic acid on the crystallisation of Fe (III) oxides. *Geoderma* 19: 279-291.
- Kohnke, H. 1972. Soil Physics. Mc-Graw-Hill, New York, USA, 244 p.
- Laserre, S & M Ríos. 1983. Evaluación de los recursos de suelos del área de frontera de la Provincia de Misiones. INTA-EEA Corrientes, 69 p.
- Leiva, E. 1997. Dinámica del hierro y su rol como factor de agregación en un Ultisol de Misiones bajo diferentes manejos. Tesis de Magister Scientae, Escuela para Graduados, Facultad de Agronomía, UBA, 154 p.
- Leiva, E; H Morrás & T Thiele. 1998. Distribución del hierro libre y total en un Ultisol de Misiones bajo tres condiciones de manejo. XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Carlos Paz, pp.143-144.
- Ligier, H; H Mateio; H Polo & J Rosso. 1990. Provincia de Misiones. En: Atlas de Suelos de la República Argentina. INTA-SEAGyP, pp.105-154.
- López Camelo, L. de; G Piccolo; R Rosell & O Heredia. 1996. Sustentabilidad del fósforo en un suelo rojo laterítico (Misiones, Argentina). INTA-EEA Cerro Azul, Informe Técnico n° 65, 11 p.
- Mc Keague, J. 1966. Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various clases of soils. *Can. J. Soil Sci.* 46: 13-22.
- Mijovilovich, A; H Morrás; C Saragovi; G Santana & J Fabris. 1998. Magnetic fraction of an Ultisol from Misiones, Argentina. *Hyperfine Interactions* C,3: 332-335.
- Mijovilovich, A; H Morrás; H Causevic & C Saragovi. 1999. Mössbauer study of the Fe mineralogy in two different Argentine soils. *Hyperfine Interactions* 122: 83-95.
- Mitchell, B; V Farmer & J MacHardy. 1964. Amorphous inorganic material in soils. *Advances in Agron.* 16: 327-376.
- Morrás, H. 2015. Porosidad y microestructura de suelos. En: Manual de micromorfología de suelos y técnicas complementarias. Loaiza J; G Stoops; R Poch & M Casamitjana (eds.). Fondo Editorial Pascual Bravo, Medellín, Colombia, pp. 205-260.
- Morrás, H & G Piccolo. 1996. Degradación física y recuperación de un Ultisol bajo cultivo de yerba mate en la Provincia de Misiones. Informe Técnico INTA-EEA Cerro Azul, n° 2, 11 p.
- Morrás, H & G Piccolo. 1998. Biological recuperation of degraded Ultisols in the Province of Misiones, Argentina. *Advances in GeoEcology* 31:1211-1216.
- Morrás, H & E Leiva. 1998. Mineralogía de la fracción arcilla de un suelo Ultisol de la Provincia de Misiones. Actas VII Reunión Argentina de Sedimentología, Salta, pp. 203-209.

- Morrás, H; A Mijovilovich; E Leiva & C Saragovi. 1998. Modifications of iron mineralogy induced by management practices in an Ultisol from Misiones, Argentina. Proceedings XVI World Congress of Soil Science, Montpellier, France, (editado en CD).
- Morrás, H; E Leiva & G Piccolo. 1999. Modificaciones de la morfología y porosidad de agregados en un Ultisol bajo diferentes tratamientos culturales (Misiones, Argentina). XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Pucón, Chile, (editado en CD).
- Morrás, H; L Moretti; W Zech & G Piccolo. 2005. Mineralogía de arcillas y su influencia en las propiedades químicas y físicas de un suelo rojo y un suelo hidromórfico del Departamento L.N. Alem, Misiones. INTA-EEA Cerro Azul, Informe Técnico n° 91, 14 p.
- Morrás, H; L Moretti; G Piccolo & W Zech. 2009. Genesis of subtropical soils with stony horizons in NE Argentina: Autochthony and polygenesis. *Quaternary International* 196, pp. 137-159.
- Moretti, L; H Morrás; W Zech & G Piccolo. 2006. Mineralogía y granulometría en una transecta SW-NE de suelos ferralíticos de Misiones. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta, (editado en CD).
- Moretti, L & H Morrás. 2018. "Líneas de piedra" en suelos del noreste argentino. Origen e implicancias (esta obra). Capítulo 3, pp. 71-102
- Oades, J & A Waters. 1991. Aggregate hierarchy in soils. *Aust. J. Soil Res.* 29: 815-828
- Piccolo, G. 1995. Efecto de diferentes cultivos utilizados como abonos verdes sobre características edáficas de un Rodudalf típico (Misiones, Argentina). *Ciencia del Suelo* 13 (2):101-103.
- Piccolo, G. 1996. Transformaciones de la materia orgánica de un suelo rojo Kandihumult (Misiones) durante el período de degradación y recuperación de la fertilidad. Tesis de Magister Scientiae, Escuela para Graduados, Facultad de Agronomía, UBA, 117 p.
- Piccolo, G. 1999. Dinámica de la materia orgánica y nutrientes en agroecosistemas de la provincia de Misiones, Argentina. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, 290 p.
- Piccolo, G; A Miglierina & R Rosell. 1996. Fracciones de la materia orgánica humificada de un suelo laterítico en el período de degradación y recuperación de la fertilidad (Misiones, Argentina). INTA-EEA Cerro Azul, Informe Técnico n° 64, 8 p.
- Piccolo, G; R Rosell & J Galantini. 1997. Estabilidad de los agregados de un suelo rojo laterítico virgen y cultivado (Misiones, Argentina). INTA-EEA Cerro Azul, Informe Técnico n° 66: 16 p.
- Piccolo, G; R Rosell & J Galantini. 1998. Transformaciones del carbono orgánico en un suelo laterítico Kandihumult (Misiones, Argentina). INTA-EEA Cerro Azul, Informe Técnico n° 67, 20 p.
- Piccolo, G; P Maiza; R Rosell & J Galantini. 1999. Composición mineralógica de la fracción arcilla de suelos rojos utilizados para el cultivo de la Yerba Mate. INTA-EEA Cerro Azul, Informe Técnico N° 69, 39 p.
- Quevedo, C & C Bellón. 1954. Conservación del suelo en Misiones, con especial referencia al cultivo de yerba mate. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Instituto de Suelos y Agrotecnia, Buenos Aires, 21 p.
- Rey Leyes, M. 1980. Provincia de Misiones (Argentina). Situación actual. Informe Seminario Internacional sobre Deterioro y Conservación de Suelos en la Cuenca del Plata, INTA-EEA Misiones.
- Sanesi, G. 1965. I suoli di Misiones, Argentina. Academia Italiana di Scienze Forestali, 343 p.
- Saragovi, C; A Mijovilovich & H Morrás. 1997. Mössbauer study of the modifications of Fe mineralogy induced by management practices in lateritic soils. (Misiones, Argentina). *Hyperfine Interactions C* 2:1-5.
- Schwertmann, U. 1990. Some properties of soil and synthetic iron oxides. En: De Boedt M; M Hayes & A Herbillon (eds.). Soil colloids and their associations in aggregates. NATO ASI Series, Series B, Physics, vol. 215. Springer Science + Bussines Media, New York, pp. 57-84.
- Schwertmann, U & R Taylor. 1989. Iron oxides. En: Dixon J & S Weed (eds.). Minerals in soil environments, 2nd edition, Soil Sci. of America, pp. 379-483
- Tisdall, J & J Oades: 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science* 33: 141-163.
- Trouse, A. 1971. Soil conditions as they affect plant establishment, root development and yield. En: Barnes K *et al.* (eds), Compaction of agricultural soils. American Society of Agricultural Engineers, Monographs, Michigan, USA, pp. 225-276.
- USDA (United States Department of Agriculture), 2008. Bulk density. Soil quality indicators. USDA-Natural Resources Conservation Service, 2 p.
- Veihmeyer, F & A Hendrickson. 1948. Soil density and root penetration. *Soil Science* 65:487-493

- Venialgo, C & D Sosa. 2015. Manejo de suelos en plantaciones de Yerba Mate y su acción sobre los coeficientes de infiltración, índice de cono y densidad aparente en el nordeste de Corrientes (Argentina). En: Compendio de trabajos publicados por el Grupo de Recursos Naturales de la EEA Cerro Azul 2010-2014. Barbaro S (ed.). INTA-EEA Cerro Azul, Miscelánea n° 71, pp. 25-30.
- Velde, B & P Barré. 2010. Soils, Plants and Clay Minerals. Springer, Berlin-Heidelberg, 349 p.