

## Capítulo 6

### **Suelos con propiedades frágicas del centro y oeste de la provincia de Buenos Aires. Argentina**

### **Soils with fragic properties of the central and western Buenos Aires province. Argentina**

Perla Amanda Imbellone<sup>1\*</sup>  
*micromorfologia@igs.edu.ar*

Jorge Eloy Giménez<sup>1</sup>

María Lilitana Mormeneo<sup>1-2</sup>

*\* Autor de contacto*

---

<sup>1</sup> Instituto de Geomorfología y Suelos. Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata.

<sup>2</sup> Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires.

## ÍNDICE CAPÍTULO 6

■ RESUMEN .....	182
■ EXTENDED ABSTRACT .....	183
■ INTRODUCCIÓN .....	186
■ DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	187
■ MATERIALES Y MÉTODOS .....	191
■ RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	193
Distribución regional de los suelos .....	193
Propiedades morfológicas .....	194
Propiedades físicas y químicas .....	201
Distribución de tamaño de partículas .....	202
Mineralogía de arcillas .....	218
Propiedades morfológicas de los horizontes frágicos (Btxb; BCxb) .....	222
Óxidos pedogenéticos .....	226
Micromorfología .....	228
Comparación entre horizontes Btxb y Btb .....	230
■ GÉNESIS DE HORIZONTES CON PROPIEDADES FRÁGICAS .....	231
■ CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS ESTUDIADOS .....	235
■ CONSIDERACIONES FINALES .....	237
■ AGRADECIMIENTOS .....	239
■ BIBLIOGRAFÍA .....	239

## ■ RESUMEN

El área de estudio se encuentra en la región central y oeste de la provincia de Buenos Aires (Pampa Arenosa o Mar de Arena Pampeano). Es una franja de alrededor de 300 km de extensión que, de O a E, abarca los partidos de Carlos Tejedor, Carlos Casares, Saladillo y Roque Pérez, entre 35°21' y 35°37' de latitud S y 59°19' y 62°26' de longitud O. La región está cubierta principalmente por depósitos pleistocenos y holocenos arenosos, tales como dunas longitudinales y parabólicas y mantos extendidos, donde los suelos son poco desarrollados. En cambio, en las áreas interdunarias los procesos sedimentarios y/o pedogenéticos generaron suelos y paleosuelos con secuencias de horizontes y morfologías complejas de texturas más finas, algunos con distinto grado de endurecimiento y propiedades frágicas, cuya génesis es poco conocida. Así, los principales objetivos de esta investigación son: Identificar los ciclos pedogenéticos; relacionar la génesis de éstos con los ciclos sedimentarios y actualizar el conocimiento de las propiedades y génesis de horizontes con propiedades frágicas. Para ello se realizó la caracterización integral de 10 perfiles de suelos ubicados en sitios representativos de áreas interdunarias. Se describió y priorizó la morfología y se determinaron: granulometría, análisis químicos convencionales, óxidos libres totales de Fe y Si, mineralogía de arcillas y micromorfología en secciones delgadas. Se vincularon las propiedades de los suelos con la topografía, el clima actual y pasado y la vegetación. Se discutieron problemas en la clasificación de los suelos según Taxonomía de Suelos y el sistema WRB. La mayoría de los suelos poseen dos o tres ciclos pedogenéticos superpuestos que incluyen horizontes subsuperficiales indicadores de fuerte desarrollo por acumulación de arcilla iluvial (Bt y Btb) y, en el caso de los ciclos más profundos, con endurecimiento reversible (Btxb) y estructura lenticular/laminar; también es marcada la acumulación de sodio intercambiable y/o carbonato calcio (Btnb, Btk, Btkn, BCkb). Los posibles mecanismos de la densificación de los horizontes frágicos serían: hidroconsolidación o autocolapso; proceso post-depositacional favorecido por texturas medias y abundancia de agua; y criogénesis. Continuarían procesos pedogenéticos, como la argiluvación, responsable de la formación de puentes arcillosos. Los óxidos de Fe y la SiO<sub>2</sub> no influirían en la densificación. Dos modelos de formación de la estructura laminar y/o lenticular se basan en la hipótesis que hubo acciones criogénicas de distinta intensidad en las áreas interdunarias, más húmedas, durante el criómero cuaternario: 1) congelamiento superficial, cuando los horizontes frágicos estaban cerca de la superficie, o, 2) presencia de permafrost discontinuo o esporádico cuya posible existencia se dedujo por la extrapolación de isothermas, usando la presencia de moldes de cuñas de hielo de distintos lugares del país como puntos de referencia. Los modelos necesitan ser confirmados mediante estudios de campo y laboratorio detallados.

### Palabras clave

suelos, génesis,  
propiedades frágicas,  
centro y oeste provincia de Buenos Aires, Argentina.

## ■ EXTENDED ABSTRACT

The study area is located in central and western Buenos Aires province, Argentina. It extends along 300 km between 35° 21' - 35° 37' S and 59° 19' - 62° 26' W. The altitudes range from 95 m asl to the W to 30 m asl to the E. The area is a part of the so-called "Sandy Pampa" or "Pampean Sand Sea", which covers about 200,000 km<sup>2</sup> and extends throughout the provinces of Buenos Aires, La Pampa, Córdoba, San Luis and Santa Fe. It is covered mainly with sandy holocene and pleistocene deposits, with longitudinal and parabolic dunes and sand sheets, separated by interdune areas as the most common landforms; the dunes, which have been smoothed by wind and water and stabilized by vegetation, are relict forms of much drier paleoclimates (Pleistocene). Slightly developed soils are found in the dunes; conversely, in the interdune areas sedimentary and/or pedogenic processes originated soils with complex horizon sequences and morphologies, finer textures and buried horizons, which reflect climatic fluctuations since early Pleistocene. Many of the subsurface paleohorizons, identified as Btxb or BCxb, have lenticular/platy structure and fragic properties that can affect the circulation of fluids and root penetration; the genesis and classification of these horizons is doubtful. The main goals of this research are to identify the pedogenic cycles, to relate their genesis with the sedimentary cycles and to obtain a deeper insight into the properties and genesis of the horizons with fragic properties.

Ten soil profiles located in representative sites of interdune areas and a dune were described and sampled for analyses. The pedons are distributed along 300 km, from Carlos Tejedor in the west (longitudinal dunes area) to Roque Pérez in the east (parabolic dunes area). Analyses included: grain-size distribution, conventional chemical parameters, free oxides, clay mineralogy and micromorphological description in thin sections. The pedogenic cycles were separated based on field morphology: boundaries, structure and consistence.

The present climate of the region is temperate-humid. In the study area, mean annual precipitation is 890 mm to the E and 840 mm to the W. The soil moisture regime is udic and the aquic regime is widespread in low-lying areas. The region is characterized by alternations of dry and humid conditions; thus, during in the 1930s and 1950s it has suffered from severe droughts and wind erosion; a humid cycle began in the early 1970s and several years with precipitation far beyond the long-term means have been recorded, which brought about extensive waterlogging in interdune areas. The mean annual temperature is 15-16 °C, averages of the hottest (January) and coldest months (July) are 22-25 °C and 7-8 °C, respectively. The lowest temperatures recorded are -7.5 °C to the east and -11.0 °C to the west. The soil temperature regime is thermic. The native dominant plant communities, now drastically modified by farming and grazing, are tussock or psammophilous grasslands in higher sites (dunes, sand sheets); hygrophilous and halophilous communities are found in low-lying areas.

The region includes a great diversity of soils, revealed by a variety of properties, processes and taxonomic units: Natrudolls, Natralbolls, Natraqualfs, Epiaquolls, Albaqualfs, Hapludolls (Soil Taxonomy) and Solonetz, Stagnosols, Planosols, Phaeozems (WRB). Present and past pedogenic processes are of the same nature but their degree of expression differs. In the modern cycles, hydromorphism is widespread; episaturation due to perched water tables linked to microrelief is more common than endosaturation, since the water table only affects some soils temporarily. Sodification is usually linked to hydromorphism in soils with aquic regime. Melanization is only observed in the modern cycles. Lessivage and calcification are conspicuous in the older cycles. The fragic horizons are affected by lessivage, hydromorphism and calcification. Micromorphology reveals that these processes have not been simultaneous.

Except Pedon 7 located in a dune and taken as a reference, all the pedons have two or three superimposed pedogenic cycles, where the recent cycles have an influence on the older ones. In the pedons with

three cycles, the bottom cycle (I) consists of an incomplete soil topped by buried illuvial horizons with platy/lenticular structure and “fragic properties” (Btxb, BCkb). The pedogenic character is evidenced by well expressed features of clay illuviation and hydromorphism; high levels of exchangeable sodium and calcium carbonate are frequent. The intermediate cycle (II) -which includes Bt horizons or, in one case, a Bw horizon- is generally separated from the bottom cycle by an abrupt or clear boundary, which is found at mean depth of 70 cm and is considered as a guide in the area for the oldest pedogenic cycle. The upper cycle (III) is a slightly developed soil, with A-AC-C or A-AC horizons. An example of this profile is Pedon 3: A-AC-C-2Btb-3Btkxb1-3Btkxb2-3BCb. In other pedons the horizons overlying the oldest cycle is not well defined. Two pedons differ from the others because the upper cycle exhibits a strong evolution due to the presence of an E horizon, which has not the characteristics of a fragipan, as is found elsewhere in the world.

The horizons with fragic properties (Btxb, BCxb) are discontinuous in the landscape; they occur at an average depth of 70 cm and their thickness varies mainly between 20 and 40 cm. They are brittle and, except for those with high content of calcium carbonate, they slake in water. They have mainly lenticular and/or platy structure, which differs from that described in many parts of the world, where prismatic structure is common.

Grain-size distribution is highly variable in each pedon and between pedons. This is attributed to: a) Heterogeneity of the original deposits indicated by textural discontinuities and changes in trends of sand and silt depth functions, and b) Reorganization of the fine material due to past and/or present pedogenesis, which in some cases is very intense, revealed by the presence of E horizons and bleached seams. The texture of the upper horizons (A, AC, C) is coarser than that of the underlying horizons. The uppermost Btb horizons have more clay and silt than the Bt horizons with fragic properties (Btx). The fragic and non-fragic B horizons are coarser towards the east of the transect. This would be ascribable to local redistribution of materials in the interdune areas.

Illite is the dominant clay mineral in all soils, with minor variations between horizons, attributed to lithological discontinuities and/or pedogenic differentiation. In particular, Btx horizons usually have more illite than expandable+interlayered minerals. It is estimated that climatic conditions in the late Pleistocene and Holocene were not favorable to strong transformations and/or neogenesis in soils.

Soil matrix has close packing in a variable degree. Microstructure of fragic horizons is mainly subangular and angular blocky; the lenticular microstructure is less visible at microscopic level than at naked eye. Macroporosity is low with abundant mesopores consisting of fissures and few vughs, where roots grow. Pedofeatures have been generated by lessivage (clay coatings and bridges), calcification (sparry calcite in voids, micritic impregnation in the matrix, etc.) and hydromorphism (thin amorphous coatings in voids and/or matrix impregnations). The relative position of the features in voids reveals that clay illuviation has preceded the two other processes.

Fragipan brittleness is attributed in many works to illuviated cementing agents such as silica, iron oxides, amorphous aluminium, hydrous aluminosilicates minerals and clay minerals. In our research, pedogenic silica and iron oxides are excluded as cementing agents since their contents in the fragic horizons are similar or lower than in the non-fragic horizons. Bonding between matrix particles is attributed to illuvial clays bridges.

Two mechanisms have been proposed for the densification of fragipans: hydroconsolidation and cryogenesis, or a combination of both. Hydroconsolidation involves the self-weight collapse of wet soils. This process affects sediments, such as loess, that have moderate quantities of clay (5-30%), adequate depth

for an effective overburden pressure (40-80 cm) and a humid climate for water surplus. Most of the B horizons of the studied soils meet these conditions. Collapse would be a post-depositional process followed by pedogenic processes such as lessivage, reflected in the presence of clay bridges between grains.

Cryogenesis consists of a disruption of materials and a textural rearrangement due to the compression exerted by segregation of ice lenses during the alternation of freeze-thaw cycles in soils affected by permafrost or, at least, by seasonal freezing when the top of the Btxb/BCxb horizons were near the surface. These conditions would have affected the interdune areas, more humid, during the Quaternary cryomeres. This idea has been proposed by Dr. E.A. FitzPatrick based on the presence of lenticular/platy structure, which would be the upper part of the partially preserved permafrost structure, and would mark a discontinuity with the overlying horizons. These cryogenic processes would have modified the original structure generating a fracturing structure. These actions would have preceded other pedogenic processes which cause particle bonding.

The assumption of the presence of permafrost or deep freezing is based on an extrapolation from climate isotherms using the occurrence of ice-wedge casts. It is well established that an average annual temperature of -3.5 to -6 °C is required for the formation of ice-wedge casts. The study area is about 1000 km to the north of Puerto Madryn (Chubut province) where these features were reported. If a temperature decrease of 1 °C/150 km is assumed, the temperature in the area would have been 0 °C  $\pm$  1°C, which would have been sufficient for the formation of discontinuous or sporadic permafrost or, at least, deep freezing during the late Pleistocene. The models need to be confirmed through detailed field and laboratory studies.


The soils include mollic, argillic, natric and, in two cases, albic diagnostic horizons according to Soil Taxonomy. This system does not reflect, even at subgroup level, the presence of Btx horizons, since they fail to meet two characteristics of the “fragipan diagnostic horizon”, namely structure and absence of carbonates; conversely, these horizons meet the requirements of “fragic properties”, but no fragic subgroup has been contemplated in the great groups identified in this research. The WRB system has permitted to reflect the presence of buried soils but not the presence of Btx horizons because the “fragic” qualifier is applicable to soils with a “fragic horizon”, whose requirements are, for the most part, similar to those of the “fragic diagnostic horizon” of Soil Taxonomy.

### Keywords

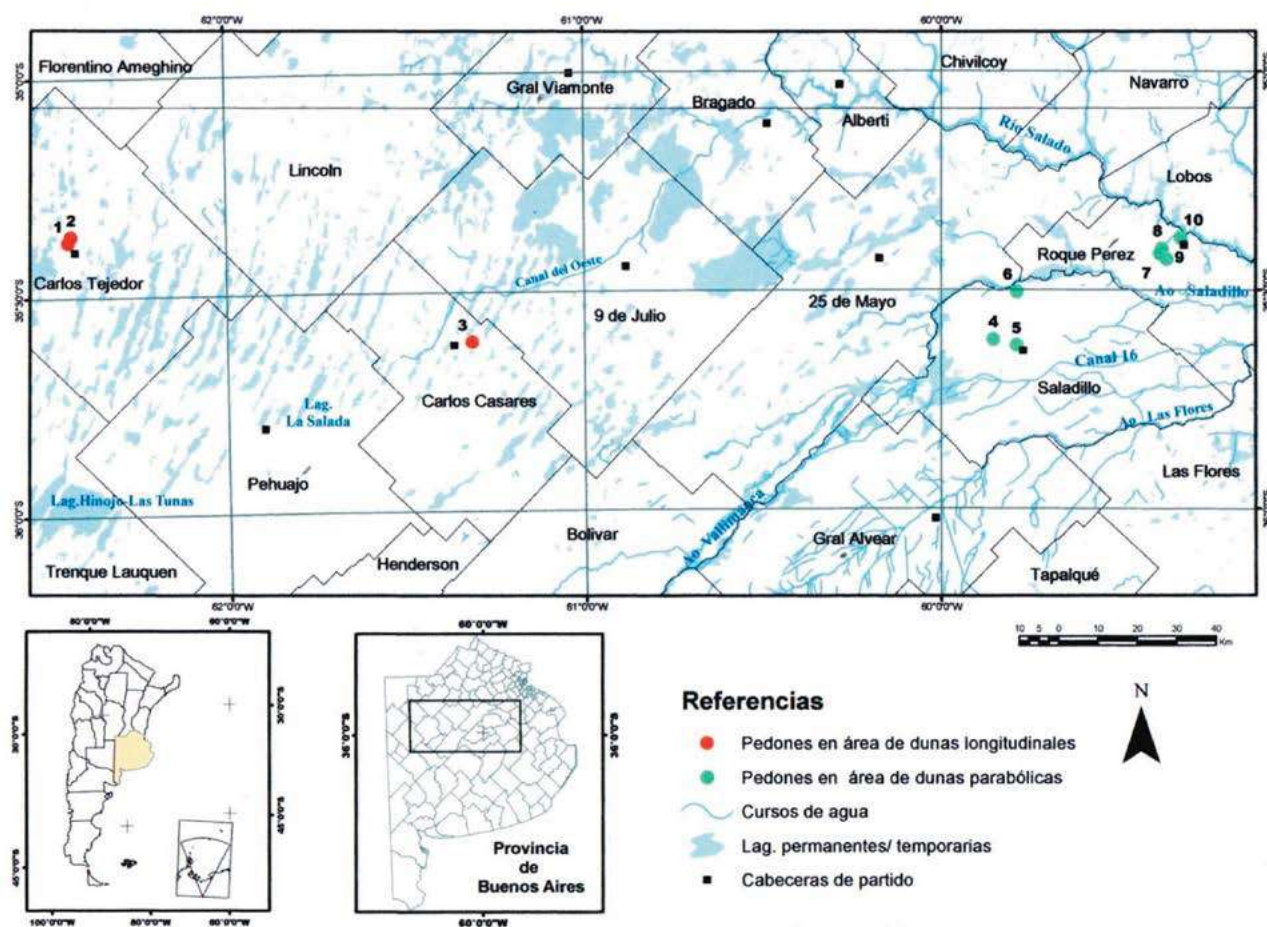
soils, genesis,  
fragic properties,  
Central and western Buenos Aires province, Argentina.



## ■ INTRODUCCIÓN

Los suelos estudiados **Figura 1**  se encuentran en áreas interdunarias de la región central y oeste de la provincia de Buenos Aires, cubierta en gran parte por depósitos holocenos y pleistocenos arenosos, tales como dunas longitudinales y parabólicas y mantos extendidos; la zona de trabajo constituye una parte del *Mar de Arena Pampeano* perteneciente a un ambiente más amplio denominado *Sistema Eólico Pampeano*, que también incluye la *Faja Periférica de Loess* (Iriondo, 1994).

La denominación “*Mar de Arena Pampeano*” sugiere cierta uniformidad en la textura de los suelos y sedimentos. El concepto podría aplicarse de manera abarcativa a los materiales originales de algunos suelos de interdunas y los suelos de dunas. Estos últimos generalmente poseen más del 60 % de arena total en todo el perfil; en cambio, los suelos que tratamos en este trabajo se hallan en las áreas interdunarias, donde los procesos sedimentarios y/o pedogenéticos generaron suelos con secuencias de horizontes y morfologías complejas, en algunos casos con diferenciación textural acentuada entre horizontes iluviales (Bt) y eluviales (E). Además, se observan horizontes con distinto grado de endurecimiento y propiedades frágicas, que suelen reflejar las variaciones climáticas acaecidas desde el Pleistoceno temprano, y paleohorizontes a escasa profundidad (Imbellone, 2011). Observaciones de campo y laboratorio realizadas por los autores de este trabajo indican que los horizontes con propiedades frágicas están vinculados a paleohorizontes.



**Figura 1:** Mapa del área de estudio y ubicación de los pedones.

**Figure 1:** Map of the studied area showing pedon sites.

La morfología muestra que la porción del perfil conservada de los paleosuelos es variable, dependiendo de la intensidad del proceso eólico y/o fluvial que actuó posteriormente a la formación de cada ciclo pedogenético. Esta es la situación descripta por Giménez *et al.* (1996) e Imbellone & Giménez (1998) para suelos del partido de Carlos Tejedor. En estos trabajos, y en base a descripciones de campo, se estableció una correspondencia biunívoca entre un ciclo pedogenético y un aporte sedimentario. Es decir, que cada suelo se habría desarrollado en un depósito sedimentario diferente reflejado a veces por cambios en la granulometría. Este modelo sencillo es claramente aplicable cuando las evidencias pedogenéticas (distintos ciclos pedológicos) y sedimentológicas (presencia de discontinuidades litológicas) lo validan, como en el caso de los suelos que se presentaron en esos primeros trabajos.

Sin embargo, a partir de nuevas observaciones realizadas por los autores de este trabajo y la comparación y análisis de los suelos de la región con las cartas de suelos de la zona (INTA, 1989, 1992), la naturaleza se muestra mucho más compleja. Se observa que la morfología del perfil (secuencia de horizontes y otros rasgos pedológicos) a veces indica la presencia de varios ciclos pedogenéticos superpuestos, y en otras ocasiones el suelo parece ser monogenético. En algunos casos, las variaciones granulométricas son dubitativas como elemento de separación de ciclos sedimentarios/pedológicos. Las situaciones mencionadas plantean varias preguntas que trataremos de analizar en este trabajo, por ejemplo: ¿Es posible realizar la correlación sedimento/suelo en forma areal? ¿Qué criterios se utilizarían para hacerlo? ¿Siempre un ciclo pedogenético se desarrolla en un mismo sedimento? ¿Cuál es la influencia del relieve local en la granulometría y el grado de pedogénesis?

Como hipótesis de trabajo se postula que: a) La morfología de los suelos estudiados permite diferenciar a veces distintos aportes sedimentarios; este hecho acontece cuando el ciclo pedológico (horizontes pedológicos) completo o incompleto se formó en un mismo material originario y/o está separado de otro ciclo pedológico-sedimentario por discontinuidades litológicas, por algún horizonte pedológico que no corresponda a un ciclo pedológico normal o por un horizonte C, por ejemplo: A, C, 2Bt<sub>nb</sub>, 2BC<sub>nb</sub>, 3Bt<sub>nkxb</sub>, donde habría tres ciclos sedimentarios y tres ciclos pedológicos, uno completo y dos incompletos. b) Diferentes ciclos pedogenéticos se formarían sobre materiales de granulometría semejante; este hecho acontecería cuando varios ciclos pedológicos se forman en sedimentos de características semejantes, posiblemente separados por una discontinuidad temporal pero no litológica, (por ejemplo: A, AC, C; Ab, AC<sub>b</sub>, C). En este caso habría discontinuidad pedológica y dos ciclos pedológicos completos. c) El ciclo pedológico más antiguo de los suelos observados está coronado por un horizonte pedológico con propiedades frágicas (B<sub>tx</sub> y/o BC<sub>x</sub>).

A partir de dichas hipótesis se plantean los siguientes objetivos: a) Analizar nuevos perfiles y caracterizar los suelos de áreas interdunarias de la región central-oeste de la provincia de Buenos Aires y sus materiales. b) Identificar los ciclos pedogenéticos. c) Relacionar la génesis de los ciclos pedogenéticos con los ciclos sedimentarios, hasta donde sea posible. d) Actualizar el conocimiento de las propiedades y génesis de horizontes con propiedades frágicas. e) Clasificar los suelos según sistemas vigentes.

## ■ DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La "Pampa Arenosa" o "Mar de Arena Pampeano" cubre unos 200.000 km<sup>2</sup> en las provincias de Buenos Aires (O y centro), La Pampa (NE), Córdoba (S), San Luis (centro y S) y Santa Fe (SO), entre los



paralelos 33° y 38° S y los meridianos 59° y 67° O (Iriondo, 1994). La altura sobre el nivel del mar varía entre 400 m al O y 30 m al E, con una pendiente regional de 0,05 %. En la provincia de Buenos Aires, la Pampa Arenosa tiene una superficie de 60.000 km<sup>2</sup>; está limitada al NE por el río Salado y hacia el SE por los arroyos Vallimanca y Las Flores y el Sistema de las Lagunas Encadenadas. Constituye una extensa planicie arreica con una muy baja pendiente regional (0,025%).

La presencia de sucesivos depósitos areno limosos con intercalaciones de suelos sugieren cambios climáticos durante el Cuaternario, con alternancia de períodos con distinto grado de humedad. En la década de 1990, Iriondo y colaboradores definen estos procesos en varios trabajos de vigencia actual (entre ellos, Iriondo, 1990a,b, 1994; Iriondo & Kröhling, 1995). Los sedimentos se originaron principalmente en la alta Cordillera por procesos nivales y criogénicos, siendo transportados por aguas de deshielo por el sistema fluvial del río Desaguadero y deflacionados hacia el N y NE por los vientos durante el último Máximo Glacial y otros períodos fríos. Los depósitos arenosos corresponden a facies proximales cercanas al área de origen de los sedimentos correspondientes a planicies aluviales del río Colorado y al sistema tributario fluvial del Desaguadero-Salado-Curacó (Zárate, 2003).

En el Pleistoceno temprano (aproximadamente 77.000 a 60.000 años AP; Estado Isotópico 4 (EI4) se habría formado el *Mar de Arena Pampeano*, así denominado por aquellos autores, en correspondencia con el período más frío del último período glacial-interglacial, y la formación de megadunas longitudinales. Estas geoformas se extienden principalmente en la parte central y norte de la provincia de Buenos Aires; tienen más de 100 km de largo, 2-5 km de ancho y hasta 6 m de alto; se disponen en formas de arcos en dirección SO-N separados por áreas de interdunas de 0,5-5 km de ancho. Actualmente se encuentran muy suavizadas y fijadas por la vegetación (Dillon *et al.*, 1989).

En el Pleistoceno medio (EI3) en estos depósitos se desarrollaron dos suelos con horizontes B y se produjo la formación de pantanos. Entre ambos ciclos pedogenéticos una aridización del clima produjo disipación de arena con formación de mantos arenosos.

En el Pleistoceno tardío, 18.000-20.000 años AP, correspondiendo con el Último Máximo Glacial (EI2), la removilización de los sedimentos formó nuevos campos de dunas, principalmente parabólicas, bien representadas en el S y E de la Pampa Arenosa que alternan con otros tipos de dunas, mantos arenosos planos y depresiones hidroecólicas. Las dunas parabólicas tienen formas de U o V alargadas con una orientación aproximada OSO-ENE; tienen un ancho que varía de 200 a 1000 m, un largo de hasta 10 km y la separación entre brazos es de 3 a 5 km (Gardenal, 1986). La forma y altura originales de ambos tipos de dunas han sido suavizadas por el agua, el viento y la acción antrópica y actualmente tienen el aspecto de geoformas estabilizadas, sin una expresión topográfica destacada.

Durante el Holoceno se registraron dos pulsos climáticos secos (entre 3500 y 1500 años AP y entre 800 y 200 años AP) con dos ciclos pedogenéticos intercalados. Existen evidencias estratigráficas y geomórficas de períodos de aridez en el Holoceno temprano y tardío entre los 9500 y 6000 años AP, con reactivación de formas eólicas y depósitos de sedimentos eólicos en áreas de San Luis y La Pampa (Tripaldi *et al.*, 2013). Señalan también que según registros meteorológicos recientes la precipitación fue un 20 % más baja durante la primera mitad del siglo XX, con períodos secos entre 1905-1906; 1929-1937; 1949-1950, con gran actividad eólica y denudación del paisaje.

Históricamente, la geomorfología e hidrología de la provincia de Buenos Aires permitieron la separación de distintas áreas con atributos naturales propios (Frenguelli, 1950; Cappannini & Domínguez,

1956, 1961; Siragusa, 1964; entre otros). Recientemente se realizaron otras regionalizaciones más detalladas (Kruck *et al.*, 2011; Zárate & Tripaldi, 2012). Estos últimos autores delimitaron detalladamente las distintas unidades eólicas de la región central de Argentina, desde el pie de monte cordillerano hasta el océano Atlántico, entre las latitudes 32° y 39° S, dividiendo al área en un primer nivel en tres dominios: Pie de Monte Andino, Meseta Norte Patagónica y Planicie Pampeana. Proponen luego una clasificación de la cubierta eólica en ocho unidades sobre la base de sus características geológicas, estructurales y geomorfológicas, formas dominantes, sedimentología y cronología. La mayor superficie es ocupada por la Planicie Pampeana, con una geomorfología heterogénea que refleja las principales características estructurales del subsuelo y del gradiente climático.

Los suelos estudiados podrían ubicarse aproximadamente a lo largo de la transecta 12b del citado trabajo (Fig. 12, Perfil b). Los suelos de la zona occidental (pedones 1, 2 y 3), quedan incluidos en la unidad CPD, (*Central pampean dunefields, Campos de dunas pampeanos centrales*) que se extiende en el S de Córdoba y Santa Fe, E de La Pampa y zona central O de Buenos Aires, y es en esta última donde se halla nuestra zona de trabajo. Geológicamente corresponde a cuencas intracratónicas (Macachín, Laboulaye, General Levalle, O del río Salado) y las formas principales son dunas lineales, cuyas edades por OSL son ca. 42,7 - 30,0 ka AP (Latrubesse & Ramonell, 2010), mientras que Iriondo & Kröhling (1995) les asignan 60-77 ka AP. La composición mineralógica es predominantemente volcánoclastica, con un área principal de aporte en los Andes y un área secundaria en las Sierras Pampeanas.

Los suelos de la zona oriental de nuestro trabajo (Pedones 4 a 10) se encuentran en la unidad LMB (*Loess and loess-like mantles and blowouts, Mantos loésicos y loessoides y blowouts*) que incluye a la parte E-central de la provincia de Buenos Aires. Geológicamente corresponde a la depresión tectónica del Salado, cuyas geoformas principales son mantos de loess discontinuos de bajo relieve y loess retrabajado fluvialmente asociado a *blowouts*. Según Martínez (1998) se observan dunas parabólicas y lineales de edad Holoceno tardío (edad OSL 700 ± 150 a AP en la base del horizonte A de suelo actual). Registros cronológicos más detallados para ambas áreas (CPD y LMB) se presentan en Zárate & Tripaldi (2012).

La precipitación media anual de la Pampa Arenosa varía aproximadamente entre 900 mm al E en la provincia de Buenos Aires y 400 mm al O en la provincia de La Pampa. Las precipitaciones medias anuales de algunas localidades de la región estudiada ubicadas de E a O son: Saladillo 892 mm (1911-1993), Carlos Casares 867 mm (1918-2003), Pehuajó 858 mm (1897-2003), Trenque Lauquen 840 mm (1918-2005) y América 827 mm (1905-1999) (datos del Servicio Meteorológico Nacional, SMN). Los regímenes actuales de humedad del suelo son *údic* en las zonas más elevadas y *ácuico* en áreas deprimidas; hacia el E en la provincia de La Pampa y en un pequeño sector del SO de la provincia de Buenos Aires el régimen es *ústico*.

La temperatura media anual es de 15 a 16 °C, con medias del mes más cálido (enero) de 22 a 25 °C y del mes más frío (julio) de 7 a 8 °C. Los registros (SMN) de cuatro localidades de la región (de E a O: General Villegas, Trenque Lauquen, Pehuajó y Bolívar) muestran que las temperaturas máximas medias de enero varían entre 32,7 y 29,9 °C y las temperaturas mínimas medias de julio entre 2,3 y 3,5 °C. Se observa también que la amplitud térmica entre ambas temperaturas aumenta hacia el O (mayor continentalidad); a saber: G. Villegas: 30,4 °C, Trenque Lauquen: 29,4 °C, Pehuajó: 26,9 °C y Bolívar 26,6 °C. La temperatura del suelo (a una profundidad de 50 cm) fue estimada de acuerdo con el procedimiento

indicado en Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 1999). Así, la temperatura media anual del suelo es de 17 °C (temperatura media anual del aire 16 °C + 1 °C), la temperatura media de verano (diciembre, enero, febrero) es de 22,4 °C (23,0 °C - 0,6 °C) y la temperatura media de invierno (junio, julio, agosto) es de 9,6 °C (9,0 °C + 0,6 °C). De acuerdo a la temperatura media anual del suelo y la amplitud entre las temperaturas de verano e invierno (12,8 °C) les corresponde a los suelos de la región el régimen de temperatura *térmico* (temperatura media anual del suelo entre 15 y 22 °C y amplitud >6 °C).


La Pampa Arenosa se caracteriza por importantes y episódicos excesos hídricos con anegamientos extensos, intercalados temporalmente con períodos de sequía intensa. Esta alternancia es más evidente en las áreas interdunarias que experimentan anegamientos más prolongados. Un ejemplo reciente de esta variabilidad es el incremento de las precipitaciones observado a partir de la década de 1970 o, para algunos autores (Pérez *et al.*, 2009) desde 1962-1965. Esto se refleja en el corrimiento de las isoyetas hacia el O; en la provincia de Buenos Aires es particularmente ilustrativa la curva de 1000 mm, que en el período 1941-1970 penetra en un pequeño sector de la zona litoral del río de la Plata, mientras que si se considera el período 1970-2000 dicha línea llega cerca del meridiano 61° O, atravesando entre otros a los partidos de Pehuajó y Lincoln. También se observa más claramente a través de los promedios móviles de 5 o 10 años en localidades como Trenque Lauquen, General Villegas, Ameghino y América, siendo los incrementos más marcados en el semestre cálido (Taboada *et al.*, 2009, Forte Lay *et al.*, 1989; Grupo Consultor, 1987). Otro caso es Bolívar, centro-sur de la Pampa Arenosa, donde la precipitación media anual fue 806 mm en el período 1913-1937, 893 mm entre 1951-1970 y 984 mm entre 1971 y 1999 (datos del SMN). Sin embargo, dentro del actual ciclo húmedo se observan variaciones apreciables en breves períodos. Un ejemplo es la localidad de Bellocq (partido de Carlos Casares) cuya precipitación media anual histórica (1941-2010) es de 886 mm, mientras que en el período 1997-2003 llegó a 1144 mm y entre 2004 y 2010 fue de 766 mm (Chacra Experimental Bellocq, Ministerio de Asuntos Agrarios, Provincia de Buenos Aires). En una escala de tiempo mayor y a través de un análisis de documentos históricos, Deschamps *et al.* (2003) han inferido para la ciudad de Buenos Aires y alrededores sobre un total de 268 años (1574-1842) un 36 % de años de sequía y 5 % de inundaciones, período que coincidiría en parte con la Pequeña Edad de Hielo; por otro lado, en el período 1842-2001 hubo 10 % de años de sequía y 25 % de inundaciones. El problema de las inundaciones en la región ha sido estudiado recientemente en detalle por Aragón *et al.* (2010) y Kuppel *et al.* (2015) e introducen un modelo hidrológico que se comentará más adelante.

La vegetación de la Pampa Arenosa pertenece según Cabrera (1968) a la Región Neotropical, Dominio Chaqueño, Provincia Pampeana y Distrito Pampeano Oriental; la comunidad dominante es la estepa graminosa o pastizal psamófilo en áreas elevadas (mantos arenosos, dunas), existiendo también praderas y estepas halófilas y diversos tipos hidrófilos en áreas más deprimidas. Desde el punto de vista fitogeográfico, León *et al.* (1984) denominan *Pampa Interior* a la región, a la que dividen en dos subregiones: hacia el Este, la *Pampa Interior Plana* o *Pampa Central*, donde se encuentran los pedones de los partidos de Saladillo y R. Pérez (4 a 10) y hacia el O la *Pampa Interior Occidental*, donde se ubican los pedones de los partidos de C. Tejedor y C. Casares (1, 2 y 3). En ambas subregiones la vegetación original ha sido drásticamente modificada por la agricultura y la ganadería, quedando pocas comunidades prístinas. En algunas de éstas, o en sitios poco modificados situados en sectores medianamente altos (mantos arenosos planos, dunas bajas), dominan las Poáceas (Gramíneas) que incluyen especies como: *Sorghastrum pellitum*, *Stipa tenuis*, *Aristida spegazzini*, *Conyza blakei*, *Bothriochloa springfieldii*,

*Chloris retusa*, *Eragrostis lugens*, *Poa ligularis*, *Poa lanuginosa*, *Schizachyrium plumigerum* y *Cenchrus pauciflorus*. En dunas altas se encuentran comunidades edáficas de pastizales psamófilos con *Elyonurus muticus*, *Panicum urvilleanum* y *Poa ligularis*. Casi todos los suelos estudiados se encuentran en áreas deprimidas (interdunas) donde prevalecen las comunidades halófitas de *Distichlis scoparia* y *D. spicata* (pelo de chancho, pasto salado) *Cynodon dactylon* (gramilla, pata de perdiz), *Chloris berroi*, *Sporobolus pyramidatus*, *Hordeum stenostachys*, *Elytrigia repens* (grama), *Spartina densiflora*, *Paspalum vaginatum* y *Malvella leprosa* (malva de salitral) (Matteucci, 2012). En cubetas con suelos con niveles bajos de sales o sodio intercambiable se encuentran con frecuencia comunidades higrófilas donde predomina el duraznillo blanco (*Solanum glaucophyllum*); encontrándose también *Hydrocotyle bonariensis* y *Lepidium sp.*, entre otras especies.

El uso tradicional de la Pampa Arenosa ha sido ganadero, principalmente engorde o invernada, basado en pasturas en que predominaba la alfalfa (*Medicago sativa*) pura o consociada con gramíneas como cebadilla criolla (*Bromus unioloides*), festuca (*Festuca sp.*), etc. Actualmente la actividad ganadera tiene en muchos casos como principal recurso las comunidades vegetales no implantadas, incluidas bajo la denominación genérica de “campo natural”, situadas principalmente en ambientes hidro-halomórficos, similares a los hallados en los suelos estudiados. Son áreas de gran heterogeneidad debido en parte a las condiciones físicas locales, y en parte al patrón parcelario que determinó una secuencia de uso particular en cada parcela (León *et al.*, 1984). En algunos casos se encuentran pasturas con agropiro alargado (*Thynopirum ponticum*), trébol blanco (*Trifolium repens*) y raigrás (*Lolium multiflorum*). En muchas dunas elevadas susceptibles a voladuras se ha implantado pasto llorón (*Eragrostis curvula*), especie exótica adaptada a suelos con baja retención de agua. A favor del incremento de las precipitaciones, desde la década de 1970 se produjo un aumento del uso agrícola, que pasó a ser dominante (46 %) en detrimento del uso pecuario (25 %) (INDEC, 2002). Los principales cultivos son: trigo (*Triticum aestivum*), maíz (*Zea mays*), girasol (*Helianthus annuus*) y, sobre todo en los últimos diez años, soja (*Glycine max*). En algunos sitios, especialmente en cercanías de cascos de establecimientos rurales, el pastizal ha sido sustituido en parte por especies forestales, particularmente eucalipto (*Eucalyptus sp.*) y casuarina (*Casuarina cunninghamiana*), especies utilizadas también para forestar dunas altas con escasa o nula cobertura vegetal. Debe señalarse en este sentido que la región carece de bosques naturales, comunidades que suelen asociarse a la presencia de fragipanes (Schaetzel & Anderson, 2005).

## ■ MATERIALES Y MÉTODOS

Se caracterizaron 10 perfiles ubicados a escala regional, en una franja E-O de la pampa central y occidental de la provincia de Buenos Aires, desde el partido de Carlos Tejedor al occidente hasta el partido de Roque Pérez al oriente; todos se ubican en la Pampa Arenosa, dentro del *Sistema Eólico Pampeano*, aunque en ambientes geomorfológicos distintos. Los suelos estudiados son entidades representativas en el paisaje, pero no guardan relaciones catenarias entre sí, excepto el suelo ubicado en una duna parabólica (Pedón 7) y el suelo adyacente (Pedón 8) distante unos 1000 m que se encuentra en el área plana asociada y posee propiedades frágicas. Los suelos del área occidental (Pedones 1, 2 y 3) se encuentran en los partidos de Carlos Tejedor y Carlos Casares, en la zona de dunas longitudinales, y los del área oriental en los partidos de Saladillo (Pedones 4, 5 y 6) y Roque Pérez (Pedones 7, 8, 9 y 10) donde predominan las dunas parabólicas **Figura 1** \*. Las cotas de los suelos varían desde 95

m s.n.m. en el pedón (partido de Carlos Tejedor) hasta 28 m s.n.m. en el Pedón 10, cerca del río Salado (partido de Roque Pérez), casi en el límite con la Pampa Deprimida. Los suelos se ubican en distintas posiciones geomorfológicas locales dentro de las áreas interdunarias: los Pedones 1, 2, 5, 6 y 8 en depósitos mantiformes, de relieve plano a ligeramente inclinados, con microdesniveles a veces imperceptibles, contiguos a depresiones intermedanasas, y los Pedones 3 y 4 en macrodepresiones, todos sujetos a anegamiento en episodios de lluvias intensas. Todos los suelos poseen horizontes con propiedades frágicas a distintas profundidades, excepto el Pedón 7 que se halla en la parte cuspidal de una duna parabólica. Este perfil se incluye como referencia, ya que la mayoría de los estudios que se refieren a suelos de la Pampa Arenosa suelen mencionar a este tipo de suelo, y en menor medida a aquellos de las interdunas, como si el carácter arenoso general de los sedimentos no generara diferenciación pedológica en las áreas comparativamente más bajas del paisaje.

En la cartografía de semidetalle del INTA (1992) los suelos de las áreas interdunarias se distribuyen en el paisaje formando generalmente asociaciones y complejos. Las propiedades de algunas de sus Series se corresponden a veces con las de los suelos analizados en este trabajo, aunque la similitud es sólo parcial. En algunos casos existe coincidencia con la clasificación a nivel de Subgrupo; por ejemplo, el Pedón 3 (Hapludol tapto-árgico) y el Pedón 8 (Natralbol típico) con las Series Saladillo y Villa Moll, respectivamente. Sin embargo, los perfiles difieren en secuencias de horizontes y algunas propiedades morfológicas, físicas y químicas. Existen además varias Series que contienen horizontes endurecidos y/o estructura laminar, pero que no siempre coinciden en secuencias de horizontes, textura, presencia de carbonatos y otras propiedades; por ejemplo, las Series Santa Rita, La María Luisa, Tronconi, Pueblitos y La Paulina. Por lo tanto, las correspondencias son solo aproximaciones ya que la heterogeneidad de los suelos en el paisaje es tan marcada que se debería trabajar a escala detallada para homologar cada unidad taxonómica en las asociaciones y complejos.

El análisis geomorfológico general se realizó en base a cartas planialtimétricas del Instituto Geográfico Militar, IGM (actualmente Instituto Geográfico Nacional, IGN) en escala 1:50.000 (Hojas 3563-29-1, Carlos Tejedor; 3560-25-3, Carlos Casares; 3560-28-3, Saladillo y 3560-29-1, Roque Pérez), mosaicos aerofotográficos en escala 1:50.000, imágenes satelitales Landsat, imágenes Google-Earth y, sobre todo, en base a observaciones de campo. Aún dentro de las áreas deprimidas hay heterogeneidad pedológica y algunos suelos no muestran propiedades frágicas; éstos fueron desestimados luego de tareas de comprobación en pozos de observación. Los suelos presentados en este trabajo fueron cuidadosamente seleccionados en el campo para mostrar la distribución geográfica, extendida y discontinua de las propiedades frágicas, y seguramente de otras propiedades, hecho del cual aún no tenemos explicación, pero que confirma una vez más la intrincada variación de tipos pedológicos ya indicados en los complejos cartográficos del área. Los muestreos se realizaron cuando las áreas interdunarias no presentaban anegamiento o éste era mínimo.

Los suelos se describieron, analizaron y clasificaron según normas vigentes en el país (Schoeneberger *et al.*, 1970; Soil Survey Division Staff, 1993). La distribución por tamaño de partículas se realizó por el método de la pipeta (Carver, 1971), con oxidación de la materia orgánica con agua oxigenada y dispersión previa con hexametáfosfato de sodio. Se utilizó la escala de Wentworth a intervalos de 1 phi ( $\emptyset$ ) porque permite obtener mayor detalle del tamaño de partículas del material. Se analizó: a) Moda, media gráfica (Mz), relación material grueso/fino (250-31  $\mu\text{m}$ / $<2 \mu\text{m}$ ) y relación arcilla fina/arcilla gruesa ( $<1/1-2 \mu\text{m}$ ) en muestra total, y b) Discontinuidades litológicas en material libre de arcilla (1000-2  $\mu\text{m}$ ).





Los intervalos granulométricos de las subfracciones corresponden a la escala sedimentológica, pero el nombre de las clases texturales y los intervalos de arena, limo y arcilla totales (<2 mm), pertenecen al sistema USDA (Soil Survey Division Staff, 1993) por tratarse de un trabajo de suelos. En un trabajo anterior (Imbellone *et al.*, 2004) los autores identificaron: a) Ciclos pedogenéticos en algunos de los suelos estudiados aquí, utilizando y valorizando el criterio morfológico de la información obtenida en el campo acerca de límites entre horizontes, estructura y consistencia en seco y húmedo y b) Ciclos sedimentarios utilizando los tenores de la fracción arena total (2000-62  $\mu\text{m}$ ), recalculada sobre base no arcillosa, y aplicando el criterio propio, según el cual las diferencias cercanas a 10 % (valor absoluto) son indicadoras de cambios sedimentarios, pues ese valor está por encima del error analítico.

Los óxidos pedogenéticos totales de hierro y sílice ( $\text{Fe}_d$  y  $\text{Si}_d$ ) se extrajeron mediante ditionito-citrato de sodio en la muestra total y se determinaron mediante colorimetría (Mehra & Jackson, 1960). La determinación de minerales de arcilla se realizó por difracción de rayos X en muestras de la fracción arcilla menor a 2  $\mu\text{m}$ , sin eliminación previa de óxidos de hierro; las arcillas se saturaron con magnesio para su homoionización. Para la semicuantificación se aplicó el método de áreas de Biscaye (1965). El estudio micromorfológico se efectuó en secciones delgadas obtenidas a partir de muestras no disturbadas de horizontes seleccionados. Las descripciones e interpretación del significado de los rasgos se realizaron según Stoops *et al.* (2010). Se utilizó microscopía óptica y electrónica de barrido en horizontes seleccionados y la combinación de ambas técnicas permitió analizar la relación entre el material grueso y fino y vacíos, principalmente en horizontes con propiedades frágicas (Payton, 1983).

Los suelos se clasificaron según Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 2014) a nivel de subgrupo, con algunas adaptaciones ya utilizadas en la Argentina (subgrupos tapto-árgico y tapto-nátrico) y el sistema WRB (IUSS Working Group WRB, 2015) al segundo nivel.

## ■ RESULTADOS Y DISCUSIÓN

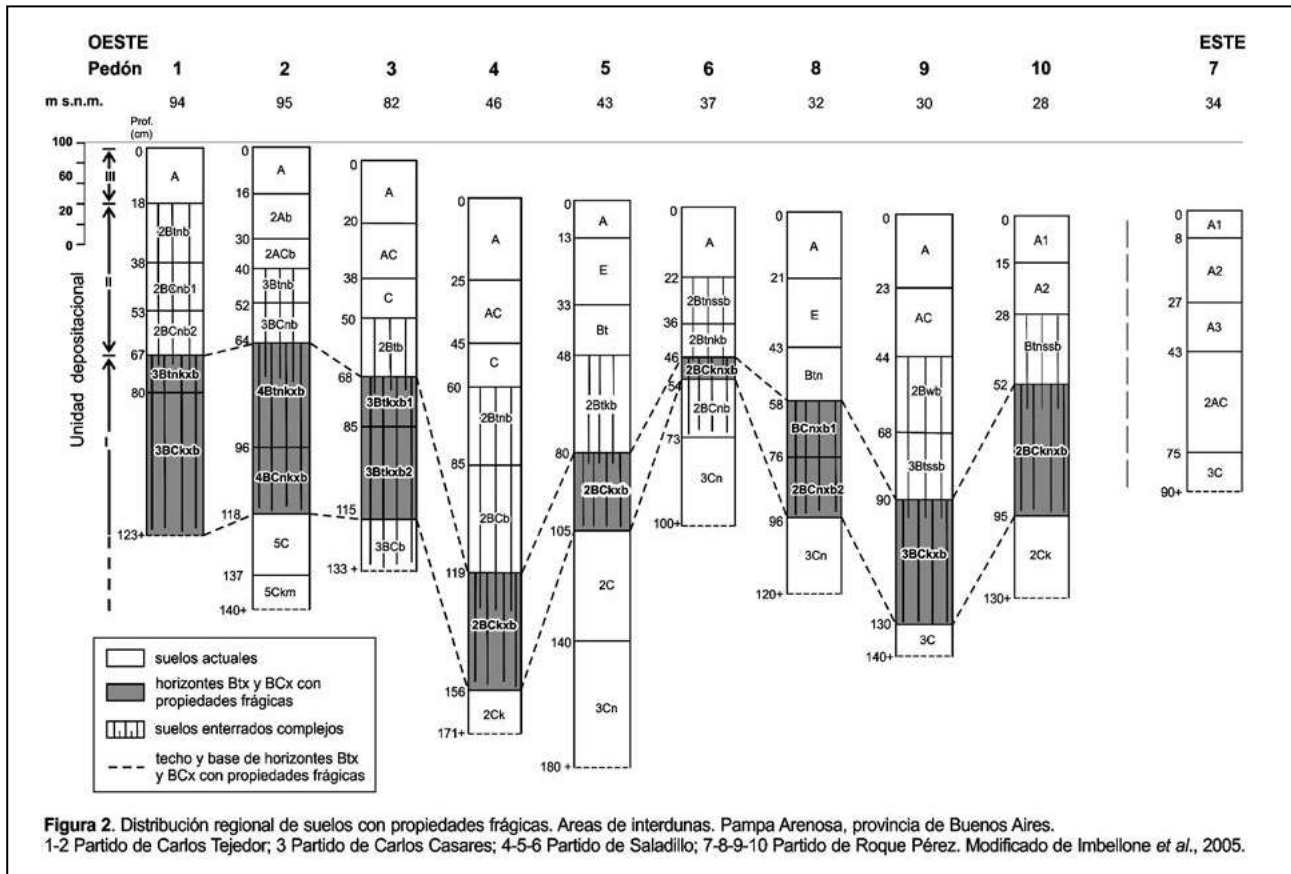
### Distribución regional de los suelos

En la **Figura 2**  se presentan sucesiones de suelos y paleosuelos con varios ciclos pedogenéticos superpuestos y soldados a escasa profundidad (Imbellone *et al.*, 2004), caracterizados morfológicamente en la **Tabla 1** ; los ciclos inferiores son incompletos, están fuertemente desarrollados y hay influencia de los ciclos más modernos sobre los más antiguos. Los materiales originarios serían depósitos acrecionales, aunque con secciones menos espesas que los hallados en las sucesiones suelos-paleosuelos de la región oriental del Sistema Eólico Pampeano (Imbellone & Teruggi, 1993; Zárate & Blasi, 1993). Los sedimentos holocenos se habrían depositado a razón de aproximadamente 4 mm/año, si se tiene en cuenta el depósito de la tefra de 1932 que se encuentra a 19 cm de profundidad en Carlos Tejedor (Imbellone & Camilión, 1988), atrapado por la vegetación gramínea; debe señalarse que en ese período la sedimentación fue favorecida por una intensificación de las acciones eólicas (Tripaldi *et al.*, 2013).

En el techo del ciclo sedimentario/pedológico más antiguo se encuentran horizontes Btx y BCx con propiedades frágicas, cuyo carácter pedogénico es evidenciado por rasgos de iluviación e hidromorfismo. Es notable la reorganización secundaria de componentes en los planos horizontales y subhorizontales en los horizontes con estructura laminar y/o lenticular, en los cuales es posible separar a los



agregados platiformes como unidades discretas. El esquema regional presentado muestra, por un lado, la complejidad genético-pedológica indicada por los distintos procesos pedológicos actuales y pasados acaecidos, y por otro, la diversidad de tipos taxonómicos de suelos que pueden encontrarse en las zonas interdunarias del área genéricamente denominada “Pampa Arenosa”.



**Figura 2:** Perfiles de los suelos estudiados ordenados regionalmente.

**Figure 2:** Profiles of the studied soils, regionally ordered.

## Propiedades morfológicas

Las principales características morfológicas de los suelos se indican en la **Tabla 1** <sup>☉\*1</sup> y **Figura 3** <sup>☉\*1</sup>. En las áreas interdunarias, de relieve plano o plano-cóncavo, el enriquecimiento en materiales finos por escurrimiento y depositación y el mayor aporte de agua generaron suelos maduros, que contrastan con los de las dunas, de escaso desarrollo (Imbellone *et al.*, 2004); generalmente, el pasaje entre ambos se produce de manera poco perceptible en muy corta distancia (2-3 m). Esta distribución confirma el esquema anteriormente establecido (Imbellone & Giménez, 1998). Analizando las secuencias de horizontes y propiedades morfológicas de estos suelos se advierte, con mayor o menor claridad, que la gran mayoría de los pedones poseen dos o tres ciclos pedogenéticos superpuestos. Con excepción del Pedón 7, situado en una duna y tomado como referencia, todos los perfiles poseen horizontes indicadores de fuerte desarrollo pedológico por acumulación de arcilla iluvial (Bt y Btk), algunos de los cuales poseen endurecimiento reversible (Btxb); también es marcada la acumulación de sodio intercambiable y/o carbonato de calcio (Btbn, Btk, Btkn, BCkb).

Tabla 1: Propiedades morfológicas, físicas y químicas seleccionadas de los suelos estudiados.  
Table 1: Selected morphological, physical and chemical properties of the studied soils

Horizontes	Profund. (cm)	Limite (tipo/ forma)	Color		Estructura (tipo, clase, grado)	Consistencia		Clase text.	Granulometria			C org.	pH	CE	Cutanes	Mot./Concr.	CaCO <sub>3</sub>
			Seco	Húmedo		Seco	Húm.		Arena	Limo	Arcilla						
Pedón 1. TS: Natrudol abruptico. WRB: Abruptic Solonetz (Protocalcic, Cutanic, Siltinovic). Coordenadas: 35° 22' 25" S, 62° 26' 30" O, 94 m snm. Partido de Carlos Tejedor																	
A	0-18	Neto/Pl.	10YR 5/2	10YR 3/2	BS, f,m, d	b	fr	FL	31,4	57,4	11,2	2,30	7,3	<1	0	1/0	0
2Bt <b>nb</b>	18-38	Claro/Pl.	7.5YR 6/4	7.5YR 4/4	BS, m, m	m d	fi	Fal	17,8	53,0	29,2	0,83	7,6	2,87	2	1/0	0
2BC <b>nb</b> 1	38-53	Grad./Pl.	7.5YR 6/3	7.5YR 4/3	La, f, m	m d	fi	FL	15,2	61,1	23,7	0,66	7,9	9,40	1/2	0/0	1
2BC <b>nb</b> 2	53-67	Neto/Pl.	7.5YR 5/4	7.5YR 3/4	La → M	d	fi	FL	19,2	63,3	17,5	0,35	7,6	17,23	1	0/0	1
3Bt <b>nkxb</b> ▲▲	67-80	Claro/Pl.	7.5YR 6/4	7.5YR 4/4	P, m,m/BA	m d	fi, q	FL	21,1	52,9	26,0	0,43	8,0	6,29	2	0/0	2
3BCK <b>xb</b> ▲▲	80-123+		7.5YR 6/4	7.5YR 4/4	La,g,fi/Le, f	m d	fi, q	FL	24,6	50,2	25,2	0,30	8,1	4,81	2	1/0	3
Pedón 2. TS: Natrudol abruptico. WRB: Haplic Phaeozem over Haplic Solonetz (Protocalcic, Cutanic, Siltic). Coordenadas: 35° 21' 35" S, 62° 26' 00" O, 95 m snm, Partido de Carlos Tejedor																	
A	0-16	Claro/Pl.	10YR 5/2	10YR 3/2	BS, f, d → G	b	m fr	F	40,9	45,7	13,4	3,83	6,3	<1	0	2/0	0
2Ab	16-30	Claro/ir.	10YR 4,5	10YR 2/2	BS, f, d	b	m fr	FL	30,6	51,2	18,2	2,80	7,3	<1	0	0/0	0
2ACb	30-40	Neto/Pl.	7.5YR 6/3	7.5YR 4/3	M	lig d	fr	FL	27,7	59,7	12,6	0,82	8,0	1,50	0	0/0	0
3Bt <b>nb</b>	40-52	Neto/Pl.	7.5YR 5/4	7.5YR 3/4	P, m, m	d	fi	Fal	17,6	53,6	28,8	0,68	7,8	5,74	2	0/0	0
3BC <b>nb</b>	52-64	Neto/Pl.	7.5YR 7/3	7.5YR 4/3	M → Le, d	d	fi	FL	18,7	69,8	11,5	0,52	8,2	6,46	1/2	1/0	1
4Bt <b>nkxb</b> ▲▲	64-96	Grad./Pl.	7.5YR 6/4	7.5YR 4/4	Le, m, m	m d	fi, q	FL	20,4	58,5	21,1	0,42	7,9	1,46	2	0/0	2
4BC <b>nkxb</b> ▲▲	96-118	Grad./Pl.	7.5YR 6/6	7.5YR 4/6	Le,m,d → M	d	fi, q	FL	24,0	51,5	24,5	0,17	8,1	<1	1/2	0/0	2
5C	118-137	Neto/Ond.	7.5YR 7/4	7.5YR 4/4	M	d	fi	FL	37,4	51,1	11,5	0,10	8,1	<1	0	0/0	1
5CKm	137-140+		-	-	-	e d	e fi	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
Pedón 3. TS: Hapludol lapto-árgico. WRB: Haplic Phaeozem over Haplic Luvisol (Protocalcic, Cutanic, Siltic). Coordenadas: 35° 36' 50" S, 61° 18' 54" O, 82 m snm Partido de Carlos Casares																	
A	0-20	Claro/ir.	10YR 3/2	10YR 2/2	BS → M	lig d	fr	F	36,2	47,3	16,5	2,37	6,1	<1	0	0/0	0
AC	20-38	Grad./Pl.	7.5YR 4/2	7.5YR 3/2,5	M	b	m fr	F	36,7	48,4	14,9	0,79	6,2	<1	0	0/0	0
C	38-50	Neto/Pl.	7.5YR 5/2	7.5YR 3/4	M	b	m fr	FL	38,2	52,3	9,4	0,30	6,5	<1	0	0/1	0
2Bt <b>b</b>	50-68	Neto/Pl.	10YR 5/3,5	10YR 3/4	P m	lig d	fr	FL	20,2	57,1	22,7	0,29	6,4	<1	2	0/1	0
3Bt <b>nkxb</b> 1 ▲	68-85	Claro/Pl.	10YR 5/3	10YR 4/4	La file m	d	fi, q	FL	22,2	69,0	8,7	0,03	7,9	<1	1/2	0/0	2
3Bt <b>nkxb</b> 2 ▲	85-115	Claro/Pl.	10YR 5/3	10YR 3/4	La m → M	d/m d	fi, q	FL	25,2	64,5	10,2	0,23	7,8	<1	1/2	0/0	3
3BCb	115-133+		10YR 5/4	10YR 3/6	M	-	fr	FL	24,5	67,1	8,4	0,02	8,3	<1	1	0/0	0

\*1  
\*2  
\*3  
\*4  
\*5  
\*6  
\*7



**Tabla 1: (cont.)**  
**Table 1: (cont.)**

Horizontes	Profund. (cm)	Límite (tipo/ forma)	Color		Estructura (tipo, clase, grado)	Consistencia		Clase text.	Granulometría			C org.	pH	CE dSm <sup>-1</sup>	Cutanes	Mot./Concr.	CaCO <sub>3</sub>
			Seco	Húmedo		Seco	Húm.		Arena	Limo	Arcilla						
Pedón 4. TS: Epiacuíl tapio-nátrico. WRB: Mollic Stagnosol (Loamic) over Stagnic Solonetz (Protocalcic, Cutanic, Loamic). Coordenadas: 35° 36' 50" S, 59° 51' 20" O. 46 m snm Partido de Saladillo																	
A	0-25	Neto/Pl.	10YR 4/1	10YR 2/1	M → G	lig d	m fr	FA	61,6	29,5	8,9	1,44	7,4	1,49	0	2/0	0
AC	25-45	Claro/Pl.	7.5YR 5/2	7.5YR 3/2	M	b	m fr	FA	66,7	25,9	7,4	0,36	6,7	<1	0	2/0	0
C	45-60	Neto./Pl.	7.5YR 6/2	7.5YR 4/2	M	b	m fr	AF	74,3	22,6	3,1	0,09	6,8	<1	0	1/0	0
2Btmb	60-85	Claro/Pl.	7.5YR 5/4	7.5YR 4/4	P,m,f/BA	m d	fr	Fa	40,3	28,0	31,7	0,22	8,2	1,13	3	1/1	1
2BCb	85-119	Neto/Pl.	7.5YR 6/4	7.5YR 4/4	BS, m, d	m d	fr	FA	53,6	35,4	11,0	0,06	7,6	<1	2	1/1	1
2BCkxb ▲	119-156	Grad./Pl.	7.5YR 7/4	7.5YR 4.5/4	La,g,m/Le d	d	fi, q	FA	59,9	36,8	3,3	0,05	7,7	<1	2	1/0	3
2Ck	156-171+		7.5YR 8/4	7.5YR 5/4	M → La d	b	fr	FA	57,4	37,7	5,0	0,04	7,8	<1	0	0/0	3
Pedón 5. TS: Albacuíl aérico. WRB: Eutric Albic Planosol (Protocalcic, Loamic). Coordenadas 35° 37' 40" S, 59° 47' 20" O. 43 m snm Partido de Saladillo																	
A	0-13	Claro/itr.	10YR 4/1	10YR 2/1	M	d	m fr	F	42,1	43,0	14,8	1,69	6,8	<1	0	0/0	0
E	13-33	Claro/Ond	10YR 6/2	10YR 4/2	M	lig d	m fr	F	49,0	32,2	8,8	0,34	7,1	<1	0	0/0	0
Bt	33-48	Claro/Ond	7.5YR 6/3	7.5YR 4.5/3	SC, m, f	m d	fi	Fa	33,2	28,7	38,2	0,27	7,2	0,74	3	2/2	0
2Btkb	48-80	Claro/Pl.	7.5YR 6/5	7.5YR 4/5	BA, m, m	m d	fr	F	36,0	42,6	21,5	0,25	7,6	1,07	2	0/0	3
2BCkxb ▲	80-105	Neto/Pl.	7.5YR 7/4	7.5YR 4/4	La m/Le m	d	fi, q	FL	36,0	55,6	8,3	0,14	7,5	<1	1	0/0	3
2C	105-140	Claro/Pl.	7.5YR 7/4	7.5YR 4/4	M → La	lig d	m fr	FL	35,3	57,6	7,2	0,05	7,5	<1	0	0/0	1
2Ck	140-180+		7.5YR 8/4	7.5YR 5/4	M	b	m fr	FL	35,9	56,3	7,9	0,05	7,6	<1	0	0/0	2
Pedón 6 TS: Natracuíl vértico. WRB: Vertic Stagnic Solonetz (Protocalcic, Cutanic, Loamic). Coordenadas: 35° 30' 20" S, 59° 47' 24" O. 37 m snm. Partido de Saladillo																	
An	0-22	Neto/Pl.	10YR 6/2	10YR 4/2	M	d	m fr	FA	53,3	40,6	6,1	0,63	9,4	<1	0	0	0
2Btmsb	22-36	Claro/Pl.	10YR 4/1,5	10YR 2/1,5	P,g,f/BA	m d	m fr	FaA	46,7	20,1	33,3	0,43	9,2	2,13	3	1/0	1
2Btkb	36-46	Claro/Pl.	10YR 4/1	10YR 2/1	BA, m, m	m d	fi	Fa	44,1	19,9	36,0	0,60	9,0	1,83	3	0/0	2
2BCkmb ▲	46-54	Claro/Pl.	7.5YR 7/4	7.5YR 4/4	Le, f, m	m d	fr q	FA	52,2	28,2	19,6	0,27	8,9	<1	3	1/0	3
2BCnb	54-73	Grad./Pl.	7.5YR 7/3	7.5YR 4/3	BS,m → M	lig d	m fr	FA	57,5	24,8	17,7	0,18	8,5	<1	2	0/0	1
3Cn	73-100+		7.5YR 7/4	7.5YR 4/4	M	b	m fr	AF	81,3	14,4	4,3	0,05	8,8	<1	0	0/0	1
Pedón 7. TS: Hapludol éntico. WRB: Haplic Phaeozem (Arenic) Coordenadas: 35° 25' 00" S, 59° 23' 24" O. 34 m snm Partido de Roque Pérez																	
A1	0-8	Claro/Ond	10YR 4/2	10YR 2/2	G	b	m fr	FA	76,8	15,3	8,0	5,23	6,1	0,96	0	0/0	0
A2	8-27	Neto/Ond.	10YR 4.5/1	10YR 3/1	M	b	m fr	AF	78,4	14,2	7,4	1,10	6,1	0,36	0	0/0	0
A3	27-43	Grad./Pl.	10YR 4/1	10YR 2/1	M	lig d	m fr	AF	79,2	13,7	7,2	0,94	6,2	0,30	0	0/0	0
2AC	43-75	Grad./Pl.	10YR 5/4	10YR 3/4	M	b	m fr	A	95,7	2,8	1,5	0,20	6,8	0,17	0	0/0	0
3C	75-90+		7.5YR 6/4	7.5YR 4/4	M	b	m f	AF	85,5	10,1	4,4	0,11	6,2	0,93	0	0/0	0

**Tabla 1: (cont.)**  
**Table 1: (cont.)**


Horizontes	Profund. (cm)	Limite (tipo/ forma)	Color		Estructura (tipo, clase, grado)	Consistencia		Clase text.	Granulometría			C org.	pH	CE dSm <sup>-1</sup>	Cutanes	Mot./Concr.	CaCO <sub>3</sub>
			Seco	Húmedo		Seco	Húm.		Arena	Limo	Arcilla						
Pedón 8. TS: Natralbol típico. WRB: Mollic Stagnic Abruptic Solonetz (Albic, Cutanic, Loamic). Coordenadas: 35° 24' 22" S, 59 ° 23' 04" O. 32 m snm. Partido de Roque Pérez																	
A	0-21	Neto/ir.	10YR 5/2	10YR 3/2	M	lig d	fr	F	41,0	42,4	16,6	3,03	6,6	0,68	0	0/0	0
E	21-43	Neto/ir.	10YR 7/2	10YR 4/2	M	d	m fr	F	51,1	40,5	8,3	0,73	7,6	0,54	0	1/0	0
B <sub>tn</sub>	43-58	Neto./Pl.	7.5YR 6/4	7.5YR 4,5/4	P, m, f / BS	d	fí	Fa	35,7	27,6	36,8	0,38	8,8	2,47	2	1/0	1
BCnxb1 ▲▲	58-76	Claro/Pl.	7.5YR 7/4	7.5YR 5/4	Le, m, m	m d	fr, q	F	39,4	35,9	24,8	0,19	8,8	2,07	2	1/0	1
2BCnxb2 ▲	76-96	Claro/Pl.	7.5YR 7/4	7.5YR 5/4	La, g, f	e d	fr, q	F	49,0	30,7	20,4	0,03	8,6	1,24	1	1/0	1
3Cn	96-120+		7.5YR 7/4	7.5YR 5/4	M	b	m fr	FA	66,9	24,1	9,0	0,02	8,4	0,90	0	0/0	1
Pedón 9. TS: Epiacualf vértico aérico. WRB: Eutric Vertic Stagnosol (Protocalcic, Loaminovic). Coordenadas: 35° 25' 48" S, 59 ° 22' 16" O. 30 m snm. Partido de Roque Pérez																	
A	0-23	Neto/Pl.	10YR 5/2	10YR 3/2	M	d	fr	F	46,7	40,2	13,1	2,37	5,3	<1	0	0/0	0
AC	23-44	Neto/Pl.	10YR 6/2	10YR 4/2	M	b	m fr	FA	57,4	37,4	5,2	0,24	6,2	<1	0	1/0	0
2Bwb	44-68	Neto/Pl.	7.5YR 7/3	7.5YR 4/3	BA, m, d	m d	fr	F	50,2	31,5	18,3	0,15	6,1	<1	1	3/3	0
3Btssb	68-90	Grad./Pl.	7.5YR 7/3	7.5YR 4/3	La, g/BA m, f	m d	fr	Fa	44,4	21,7	33,9	0,10	6,1	<1	2	2/0	0
3BCkxb ▲▲	90-130	Grad./Pl.	7.5YR 7/4	7.5YR 5/4	Le m	d	fr, q	FaA	45,5	27,1	27,4	0,23	7,3	<1	2	2/0	2
3C	130-140+		7.5YR 7/4	7.5YR 5/4	M	lig d	m fr	F	48,2	29,6	22,2	-	7,6	<1	0	1/0	3
Pedón 10. TS: Natracualf vértico. WRB: Vertic Stagnic Abruptic Solonetz (Protocalcic, Cutanic, Loamic). Coordenadas: 35° 22' 50" S, 59 ° 19' 54" O. 28 m snm. Partido de Roque Pérez																	
A1	0-15	Claro/Pl.	10YR 6/2	10YR 3/2	M	d	m fr	F	44,2	46,6	9,2	1,45	8,1	2,42	0	0/0	0
A2	15-28	Neto/Pl.	10YR 6/2,5	10YR 3/2,5	M	m d	m fr	F	45,6	44,3	10,1	0,95	8,0	1,78	0	1/0	0
B <sub>tnssb</sub>	28-52	Claro/Pl.	7.5YR 7/4	7.5YR 5/4	P, m, f/BA	m d	fr	a	26,7	28,6	44,7	0,56	8,7	1,57	3	1/0	0
2BCknbx ▲▲	52-95	Neto/Pl.	7.5YR 7/5	7.5YR 5/5	Le, g, f	d	fí, q	Fa	24,3	46,8	28,9	0,27	9,0	1,84	2	1/0	2
2Ck	95-130+		7.5YR 7/4	7.5YR 4/4	M	d	m fr	F	33,1	47,3	19,6	0,06	8,1	0,91	0	1/0	2



**Referencias.** Clase *textural*: a: arcillosa; A: arenosa; AF: areno franca; F: franca; Fa: franco arcillosa; FA: franco arenosa; FaA: franco arcillo arenosa; Fal: franco arcillo limosa; FL: franco limosa. *Desleimiento*: ▲▲ total, ▲ parcial, Δ ausente. *Tipo de estructura*: BA: bloques angulares; BS: bloques subangulares; G: granular; La: laminar; Le: lenticular; M: masivo; GS: grano suelto; SC: semicolumnar. *Clase de estructura*: f: fina; m: media; g: gruesa. *Grado de estructura*: d: débil; m: moderado; f: fuerte. La barra (/) indica subestructura (estructura secundaria) y la flecha (→) tendencia a otra estructura. *Consistencia*: b: blanda; d: dura; fí: firme; fr: friable; q: quebradiza; m: muy; e: extremadamente; lig: ligeramente. *Cutanes*, *moleados/concreciones*, CaCO<sub>3</sub>: 3: abundantes; 2: comunes; 1: escasos.

La estructura presenta gran variabilidad entre pedones y dentro de cada suelo. Los horizontes eluviales son en muchos casos masivos, especialmente en el sector oriental (P4 a P10), donde se le suma en varios casos la consistencia dura en seco; en el sector occidental (P1, P2, P3), predominan los bloques subangulares en los horizontes A y el carácter masivo suele encontrarse en los horizontes AC y C del ciclo pedogenético superior. La estructura está bien expresada en la mayoría de los horizontes iluviales de todos los suelos. Se puede diferenciar el sector de los perfiles que subyace inmediatamente a los horizontes eluviales, constituido por horizontes Btb o Btnb, con predominancia de la estructura prismática, generalmente media y fuerte.

El ciclo pedogenético inferior está casi siempre separado del suprayacente por límites netos y comprende horizontes Btxb y BCxb; se caracterizan por un tipo de estructura en que predomina el eje horizontal y que se puede definir en algunos horizontes como laminar y en otros como lenticular con distinto grado de expresión, a veces muy marcada (grado fuerte) y en otros casos incipiente (grado moderado o débil). Asimismo, la expresión laminar y/o lenticular es más marcada en la parte superior de los horizontes frágicos.



La consistencia es casi siempre muy dura en seco y friable en húmedo en algunos horizontes quebradizos con propiedades frágicas, horizontes que se describirán en detalle en otra sección. La parte inferior de este ciclo culmina con un horizonte C masivo, con frecuencia carbonatado y en el caso del Pedón 2 (P2) constituyendo un horizonte petrocálcico discontinuo.

Los colores están bien diferenciados entre el sector eluvial y el iluvial. En el primero todos los horizontes A y E poseen matices 10YR, con luminosidad en seco que varía entre 4 y 5. En los horizontes iluviales los colores se tornan más rojizos y en casi todos los casos el matiz es 7,5YR. En este sector, los matices 10YR corresponden a barnices arcillo-húmicos de algunos horizontes B situados inmediatamente por debajo de horizontes A, y también entre las láminas de horizontes con características frágicas, donde dichos revestimientos son negros o gris muy oscuros (10YR 2/1 o N 3/0, seco). Colores de matriz glei se observan sólo en forma de manchones, 2,5Y 6/4 (seco), en horizontes superficiales y profundos (P5, **Figura 3H** <sup>\*2</sup>, y P8), sometidos a anegamiento frecuente por acción de capa colgada y/o freática, y ubicados localmente en posiciones levemente más deprimidas que los otros suelos, aunque regionalmente se hallen en mantos arenosos.

Los rasgos de iluviación de arcilla y humus son barnices moderados a abundantes y recubren caras de agregados, a veces en forma conspicua **Figura 3B** <sup>\*2</sup>, P1. Los rasgos redoximórficos (moteados, concreciones de Fe y Mn, zonas de pérdida) se hallan presentes en todos los pedones, salvo en el correspondiente a la duna (P7). De todas maneras, existen diferencias de intensidad en el proceso de hidromorfismo entre el área occidental y la oriental; en la primera dichos rasgos tienen menor expresión y se presentan generalmente como moteados de Fe y Mn escasos y finos en uno o dos horizontes de cada perfil; esto es congruente con el régimen de humedad údico de los suelos y con la clase de drenaje natural que es imperfecta. En cambio, en la región oriental los rasgos redoximórficos son más abundantes, casi siempre se observan en varios horizontes de cada perfil y tienen mayor contraste respecto a la matriz, con máxima expresión en el P5 **Figura 3H** <sup>\*2</sup> y P8; estas características se corresponden con el régimen de humedad ácuico de todos los suelos de este sector y con una clase de drenaje natural pobre, aunque en algunos casos puede ser imperfecta. Hay rasgos de carbonatación con distintas



formas: pseudomicelios, nódulos y rizoconcreciones. Sólo en la base del horizonte frágico del P3 la concentración posee la morfología y consistencia de una calcreta laminar, fracturada verticalmente.

**Ciclos pedológicos.** Sobre la base de los rasgos morfológicos observados en el campo **Tabla 1**  se trató de separar distintos ciclos pedológicos. En primer lugar, se consideró como morfología de referencia el techo de los horizontes frágicos que podía identificarse con cierta certeza y que consideramos, por su posición estratigráfica relativa, el techo del ciclo pedológico más antiguo. Este ciclo (I) es incompleto, incluye horizontes Btxb, BCxb y C y en todos los suelos se halla coronado por un horizonte de estructura laminar/lenticular **Figura 3** , con distinto grado de expresión, a veces muy marcada y en otros casos incipiente, casi siempre muy duro en seco y friable en húmedo. Los ciclos que sobreyacen presentan variación en sus propiedades, y en base a las características de los suelos se han diferenciado en tres grupos que se mencionan a continuación:

-*Suelos con diferenciación clara de los ciclos pedológicos superiores* (Pedones 2, 3, 4 y 9). Tienen evidencias concurrentes de secuencia de horizontes y variación en profundidad de propiedades morfológicas como estructura, tipo de límite, y a veces consistencia en seco, que dan la certeza de estar en presencia de más de un ciclo pedogenético superpuesto. El ciclo inferior más antiguo (I) constituye un suelo incompleto con horizontes iluviales (Btx y/o BCx) además de horizontes C en los Pedones 2 y 4.

**Figura 3:** Perfiles de suelos y detalles de la estructura.

**A:** P1, Natrudol abruptico (tramos escala 10 cm).

**B:** Revestimientos de arcilla y humus en caras de agregados en P1, 3BCkxb.

**C:** P3, Hapludol tapto-árgico. Los cuchillos inferiores marcan el techo de los horizontes frágicos y las líneas indican la correlación de los tres ciclos pedológicos entre ambos perfiles.

**D:** Rizoconcreción atravesando agregados en P3.

**E:** Detalle de estructura laminar gruesa, (escala 10 cm) en P3, 3Btkxb2.

**Figure 3:** Soil profiles and details of structure.

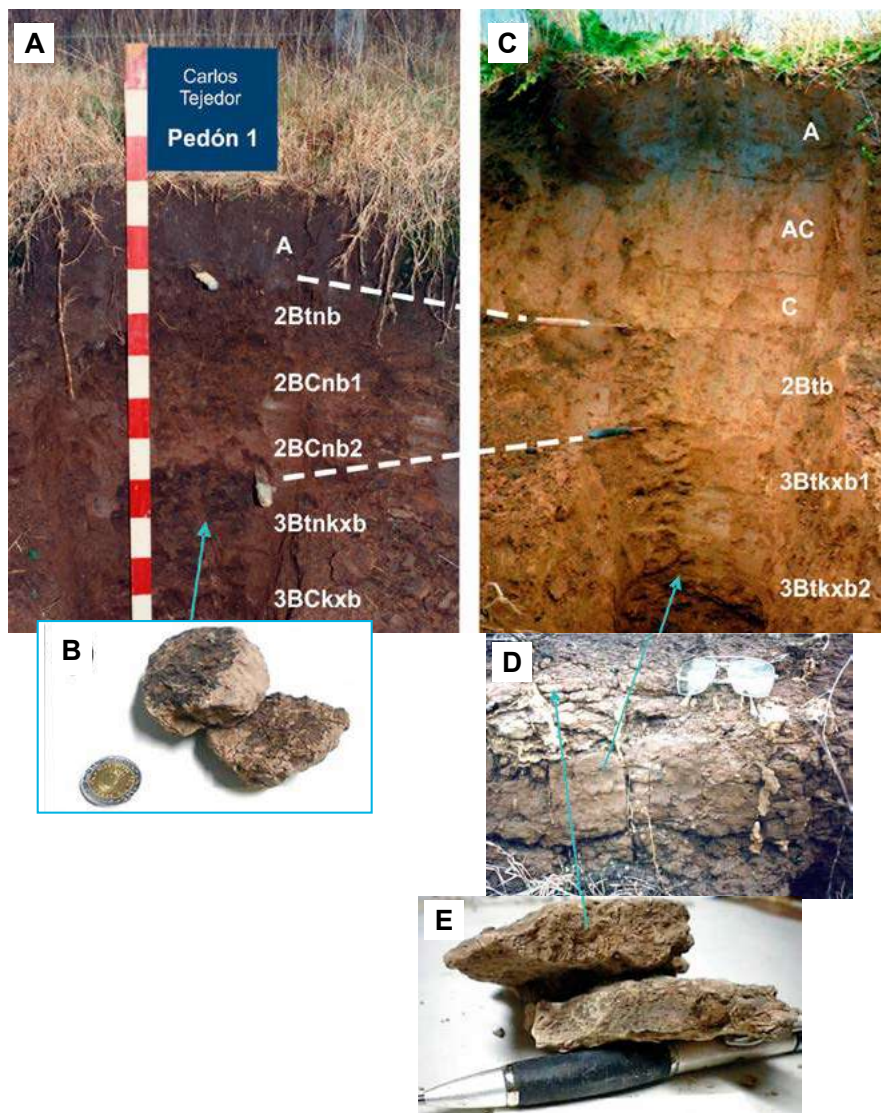
**A:** P1, Abruptic Natrudoll (scale intervals: 10 cm).

**B:** Clay-humus coatings on ped faces in P1, 3BCkxb.

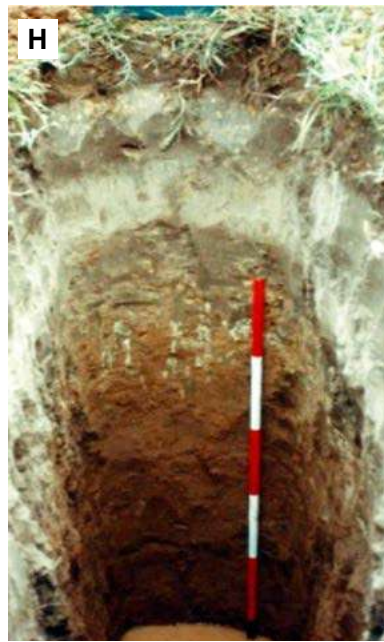
**C:** Thapto-argic Hapludoll. The lower knives mark the top of fragic horizons and the lines indicate the correlation of the three pedogenic cycles in both profiles.

**D:** Rhizoconcretion passing through peds in P3.

**E:** Detail of coarse platy structure in P3, 3Btkxb2.







**Figura 3F:** P4, Epiacualf tapto-nátrico (tramos escala 20 cm).

**G:** Agregados laminares gruesos. P4, 2BCkxb.

**H:** P5, Albacualf aérico (tramos escala 20 cm);

**I:** P10, Natracualf vértico (mitad izquierda del perfil picada con cuchillo).

**J:** Detalle de agregados lenticulares gruesos. P10, 2BCkxb.

**K:** Agregados del horizonte 2BCkxb atravesados por raíces.

**Figura 3F:** P4. Thapto-natric Epiacualf (scale intervals: 20 cm).

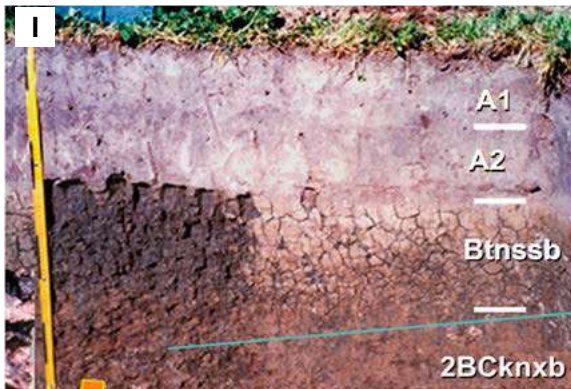
**G:** Coarse platy peds. P4, 2BCkxb.

**H:** P5, Aerice Albacualf (scale intervals: 20 cm).

**I:** P10, Vertic Natracualf (left side picked out with a knife).

**J:** Detail of coarse lenticular peds. P10, 2BCkxb.

**K:** Peds of 2BCkxb penetrated by roots.



La estructura pasa de este ciclo (I) al suprayacente (II) de laminar a bloques angulares, subangulares o prismas. El ciclo intermedio (II) posee en todos los casos horizontes Bt, a los que se agrega en un perfil (P9) un horizonte Bw. Entre los ciclos II y III la estructura varía de bloques angulares y prismas a masivo. El ciclo superior (III) es un suelo de escasa evolución con horizontes A-AC-C, A-AC o A-2Ab-2ACb.

- *Suelos sin diferenciación clara de los ciclos pedológicos superiores* (Pedones 1, 6 y 10). Estos suelos poseen, como en el caso anterior, el primer ciclo pedogenético definido por un suelo incompleto coronado por un horizonte de estructura laminar. La secuencia de horizontes de la porción que sobreyace al horizonte laminar es la de un suelo monogenético, aunque algunas propiedades como el tipo de estructura y de límite sugieren un cambio de ciclo pedogenético entre los horizontes A y B. Así, estas propiedades varían de prismas a masivo y de claro a neto, respectivamente.

- *Suelos con dos ciclos pedogenéticos* (Pedones 5 y 8). El ciclo I se separa del II por estructura y límite que pasan de laminar a bloques y de claro a neto, respectivamente. El ciclo superior posee

muy fuerte diferenciación pedogenética de horizontes y propiedades asociadas con características de un ciclo monogenético, con la presencia de horizontes de máxima eluviación (E).

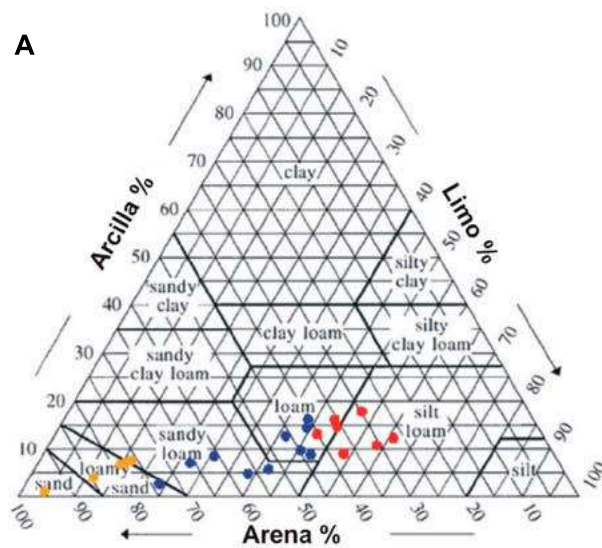
- Hay además suelos con un ciclo pedológico (Pedón 7). Se sitúan en dunas fuera del área interdunaria y tienen desarrollo pedológico débil, en materiales estratificados.

### Propiedades físicas y químicas

La textura registra valores máximos y mínimos muy variables de las fracciones granulométricas totales en los suelos de interdunas: 5-81 % de arena, 14-69 % de limo y 3-44 % de arcilla. Comparativamente, el suelo desarrollado en una duna parabólica muestra una variación más estrecha en el tenor de las fracciones: 77-96 % de arena, 3-15 % de limo y 2-8 % de arcilla.

La textura de los horizontes superficiales (A, AC y C) de los suelos de las áreas interdunarias **Figura 4A** es más gruesa que la de los horizontes subsuperficiales (Btb y Btx) **Figura 4B**. Los horizontes Btb más superficiales son más arcillosos y limosos que los Btxb. Tanto los Btb como los Btxb forman dos conjuntos de textura moderadamente distinta: en la región oriental los suelos son más arenosos (Pedones 4, 5, 6, 8, 9 y 10) y en la región occidental son más limosos (P1, P2, P3). Así, hay dos conjuntos de horizontes subsuperficiales, frágicos y no frágicos, que se hacen más gruesos hacia el E de la transecta. Esta diferenciación la interpretamos como debida a procesos locales de redistribución de materiales en las áreas interdunarias, concepto que no entraría en conflicto con trabajos antecedentes regionales del Mar de Arena Pampeano (Iriondo & Kröhling, 1995).

A



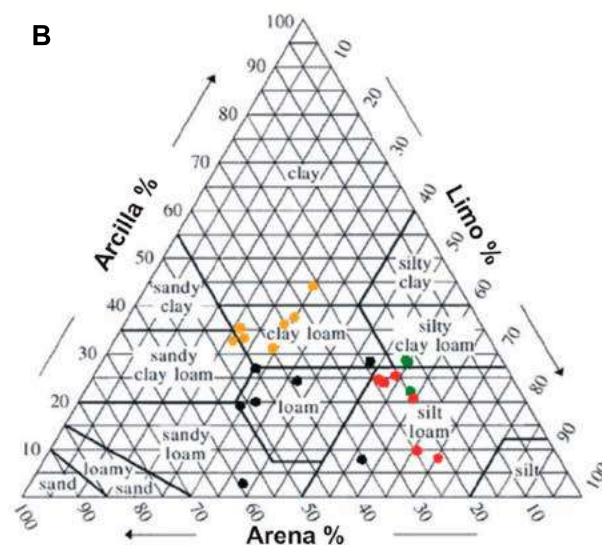
#### Materiales superficiales (Horizontes A, AC, C)

- Región Occidental (Pedones 1, 2, 3)
- Región Oriental (Pedones 4, 5, 6, 8, 9, 10)

#### Duna (Pedón 7)

- Perfil completo (A1, A2, A3, 2AC, 3C)

B



Región	Occidental	Oriental
Horizontes Btx, BCx	●	●
Horizontes Bt	●	●

**Figura 4:** Clases texturales de: **A:** Horizontes superficiales de suelos de interdunas y del suelo de duna (perfil completo). **B:** Horizontes Btx/BCx y Bt.


**Figure 4:** Textural classes of: **A:** Surface horizons of interdune soils and dune soil (all horizons). **B:** Btx/BCx and Bt horizons.


El contenido de sodio intercambiable indicado en algunos horizontes directamente por la relación de adsorción de sodio (datos no incluidos) o indirectamente por el pH en pasta, revela la amplia difusión de suelos sódicos en el área estudiada (Pedones 1, 2, 6, 8 y 10). Este catión se concentra en horizontes subsuperficiales (por debajo de los 40-50 cm) o, en menor proporción, desde la superficie o cerca de ella (P1, P6). La salinidad está menos difundida y se concentra en los pedones situados hacia el O, en la subregión de las dunas longitudinales (P1, P2; partido de Carlos Tejedor), donde se han encontrado horizontes subsuperficiales con conductividad eléctrica de hasta  $17 \text{ dS m}^{-1}$ , siendo el sodio el catión soluble dominante.

El contenido de carbono orgánico alcanza valores moderados (2-3 %) en la mayoría de los horizontes superficiales. Esos valores bajan abruptamente en los horizontes subyacentes (AC, E, B) donde siempre descienden a valores inferiores al 1 %. El decrecimiento en profundidad es bastante regular; aisladamente se observa alguna irregularidad leve, en coincidencia con alguna discontinuidad litológica.

El carbonato de calcio está siempre presente con excepción del suelo de duna. No se lo encuentra en los horizontes eluviales y se manifiesta en general desde la parte media del perfil (alrededor de 50 cm en promedio) en cantidades que varían aproximadamente entre 0,5 y 5,0 %, con valores mayores en profundidad en algunos casos. La reacción del suelo es ligera a fuertemente alcalina en la mayoría de los suelos, en particular en la parte media y profunda de los perfiles del sector oriental, como consecuencia de la presencia generalizada de sodio intercambiable y carbonato de calcio; los horizontes superficiales son en la mayoría de los casos neutros a ligeramente ácidos ya que aquellos componentes están en cantidades reducidas o no se encuentran.

## Distribución de tamaño de partículas

Los suelos de las áreas planas y deprimidas de la zona estudiada poseen una composición granulométrica muy variable, tanto si se los compara regionalmente de O a E, como en la sección vertical de cada perfil, donde hay cambios de tendencia en su contenido absoluto de las fracciones y subfracciones, ya sea entre horizontes o grupo de horizontes, indicando a veces discontinuidades litológicas. En consecuencia, es necesario analizar detalladamente la composición granulométrica de los suelos tanto en su distribución areal, como en la sección vertical de cada perfil. Un análisis detallado por subfracciones de la composición granulométrica total ( $<1000 \mu\text{m}$ ) se muestra en la **Tabla 2** . Esta información permite verificar que las variaciones granulométricas de O a E (Pedones 1 a 6 y 8 a 10) son menos marcadas que en la sección vertical de cada pedón.

El tamaño dominante en las arenas es arena muy fina (AMF) ( $125\text{-}62 \mu\text{m}$ ) salvo en el P4 y horizonte superior de P5, en los que prevalece la arena media (AM) ( $500\text{-}250 \mu\text{m}$ ). En la fracción limo predomina el limo grueso (LG) ( $62\text{-}31 \mu\text{m}$ ) y en la arcilla el tamaño  $<1 \mu\text{m}$ . Cabe señalar que la fracción arena muy gruesa (AMG) ( $2000\text{-}1000 \mu\text{m}$ ) está ausente y la arena gruesa (AG) ( $1000\text{-}500 \mu\text{m}$ ) es muy escasa, excepto en P4 y P5 **Figura 5** , P4.

Regionalmente, y como tendencia general, en los tres suelos del área occidental hay una concentración de partículas en el intervalo entre  $125$  y  $31 \mu\text{m}$  (3-5 Ø); en cambio, en los suelos del área oriental predomina, con variaciones, la fracción arena, con valores superiores a 35 %, en el intervalo  $250\text{-}62 \mu\text{m}$  (2-4 Ø), indicando que en esta última zona los materiales son más gruesos. En los perfiles situados al occidente (P1, P2 y P3) se observa que la mayor concentración granulométrica recae en las fracciones



LG y AMF. Sumando ambas fracciones, se puede determinar que en estos perfiles los valores se incrementan hacia el SE variando entre 28 y 44 % (P1), 32 a 49 % (P2) y 51 a 77 % (P3) **Tabla 2** \*1 y P2 de **Figura 5**. En los suelos ubicados al oriente no se observa una tendencia geográfica de variación de los valores de LG + AMF; éstos varían azarosamente entre 43 y 70 % en promedio. En el P4 y los horizontes superficiales del P5 la mayor concentración granulométrica corresponde a la subfracción AM.

Algunos suelos presentan un alto contenido de arcilla <1 µm en correspondencia con los horizontes iluviales (Btb), alrededor del 25 % en promedio en la zona occidental (P1-P3) y 40 % en la oriental

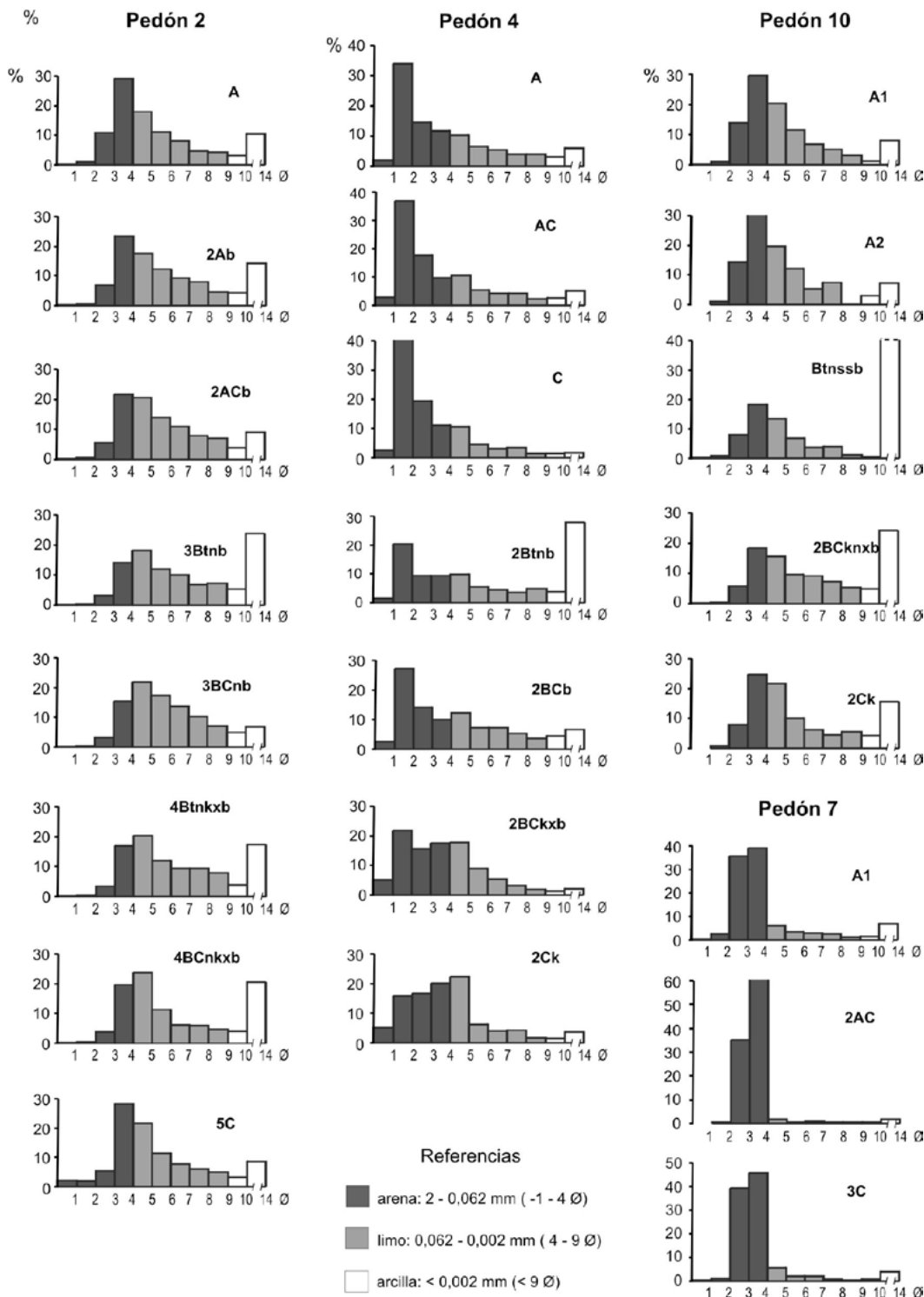


Tabla 2: Distribución por tamaño de partículas del material total (<1000 µm).

Table 2: Grain-size distribution of total material (<1000 µm).

µm Ø	1000-500 0-1	500-250 1-2	250-125 2-3	125-62 3-4	62-31 4-5	31-16 5-6	16-8 6-7	8-4 7-8	4-2 8-9	2-1 9-10	<1 <10	Mz Ø	a/f/a <sub>g</sub>	250-31/ at
Pedón 1														
A	0,00	0,20	8,04	23,20	20,96	14,58	10,04	6,54	5,24	3,46	7,74	5,38	2,20	4,66
2Bt <b>nb</b>	0,18	0,21	3,85	13,58	16,79	11,29	10,54	8,11	6,25	5,89	23,30	7,30	4,00	1,17
2BC <b>nb</b> 1	0,00	0,10	3,35	11,72	16,69	12,42	11,73	10,77	9,56	5,89	17,76	6,82	3,00	1,34
2BC <b>nb</b> 2	0,40	0,39	4,04	14,30	20,95	14,72	10,58	8,84	8,31	5,98	11,49	6,08	1,90	2,25
3Bt <b>nkxb</b>	0,14	0,42	4,53	15,97	17,73	10,75	8,85	7,70	7,92	6,22	19,76	6,83	3,20	1,47
3BC <b>kxb</b>	0,04	0,27	5,72	18,62	19,64	9,83	7,24	6,62	6,86	5,43	19,73	6,60	3,60	1,75
Pedón 2														
A	0,13	0,97	10,75	29,06	17,79	11,03	8,08	4,63	4,17	3,06	10,33	5,18	3,4	4,30
2A <b>b</b>	0,08	0,56	6,78	23,23	17,55	12,12	9,14	7,85	4,44	4,08	14,16	6,10	3,5	2,61
2A <b>Cb</b>	0,17	0,57	5,48	21,44	20,51	13,76	10,72	7,92	6,86	3,77	8,80	5,68	2,3	3,77
3Bt <b>nb</b>	0,12	0,34	3,08	14,02	18,05	11,85	9,89	6,66	7,19	5,21	23,59	7,32	4,5	1,22
3BC <b>nb</b>	0,08	0,30	3,07	15,24	21,80	17,19	13,63	10,13	7,03	4,88	6,66	5,85	1,4	3,48
4Bt <b>nkxb</b>	0,06	0,31	3,33	16,74	20,22	11,87	9,38	9,29	7,74	3,73	17,34	6,60	4,6	1,91
4BC <b>nkxb</b>	0,11	0,38	3,85	19,65	23,74	11,16	6,16	5,96	4,53	3,98	20,48	6,45	5,1	1,93
5C	2,10	1,91	5,21	28,17	21,45	11,18	7,67	5,90	4,90	3,09	8,41	5,18	2,7	4,77
5Ckm														
Pedón 3														
A	0,11	1,40	11,42	23,29	28,45	7,31	3,88	7,61	0,79	15,73**	sd	4,30	s/d	4,02
AC	0,06	1,44	10,18	25,02	34,36	6,41	4,61	3,03	2,02	12,86**	sd	4,07	s/d	5,41
C	0,01	1,37	9,57	27,28	36,57	6,56	4,87	3,28	2,74	6,67**	sd	4,17	s/d	11,01
2Bt <b>b</b>	0,05	0,55	4,16	15,45	36,47	7,61	7,03	5,97	2,75	19,95**	sd	4,63	s/d	2,81
3Bt <b>kxb</b> 1	0,29	0,45	2,97	18,53	52,57	8,74	0,80	6,92	2,81	5,89**	sd	4,43	s/d	12,58
3Bt <b>kxb</b> 2	0,37	1,21	3,20	20,46	46,77	8,58	6,50	2,66	2,76	7,48**	sd	4,43	s/d	9,42
3BC <b>b</b>	0,07	0,39	2,49	21,56	55,39	5,68	3,62	2,44	2,29	6,07**	sd	4,12	s/d	13,09

\*1  
\*2  
\*3  
\*4  
\*5  
\*6  
\*7  
\*8


**Tabla 2:** Cont  
**Table 2:** Cont..


$\mu m$ $\emptyset$	1000-500 0-1	500-250 1-2	250-125 2-3	125-62 3-4	62-31 4-5	31-16 5-6	16-8 6-7	8-4 7-8	4-2 8-9	2-1 9-10	<1 <10	Mz $\emptyset$	a/f/ag	250-31/a.t
<b>Pedón 4</b>														
A	1,97	33,79	14,32	11,53	10,03	6,37	5,22	3,91	3,93	3,02	5,91	4,02	2,0	4,02
AC	2,64	36,79	17,63	9,63	10,34	5,25	4,15	4,11	2,04	2,35	5,09	3,52	2,2	5,05
C	2,45	41,56	19,31	11,01	10,49	4,50	2,90	3,35	1,37	1,39	1,67	2,83	1,2	13,34
2Btmb	1,34	20,27	9,32	9,38	9,77	5,42	4,43	3,54	4,87	3,84	27,82	6,13	7,2	0,90
2BCb	2,42	27,18	13,98	9,99	12,12	7,16	7,26	5,27	3,63	4,50	6,48	4,38	1,4	3,29
2BCKxb	5,13	21,75	15,57	17,44	17,78	8,81	5,30	3,05	1,88	1,22	2,06	3,68	1,7	15,48
2Ck	4,99	15,81	16,54	20,01	22,09	6,09	3,88	4,13	1,51	1,40	3,55	3,82	2,5	11,85
<b>Pedón 5</b>														
A	1,06	17,90	9,33	13,84	14,44	10,33	8,18	5,55	4,53	2,42	12,42	5,47	5,1	2,53
E	1,04	20,00	11,04	16,94	17,82	9,95	7,32	3,60	3,49	1,64	7,15	4,60	4,4	5,21
Bt	0,62	11,70	7,39	13,47	15,03	6,31	3,72	1,37	2,23	1,89	36,26	6,93	19,2	0,94
2Btkb	8,3 *	6,28	4,68	16,70	18,95	9,03	6,48	4,87	3,24	4,90	16,56	5,73	3,4	1,88
2BCKxb	4,00 *	3,79	4,76	23,48	27,14	10,68	8,21	5,72	3,89	2,40	5,91	5,02	2,5	6,66
2C	0,75	2,87	4,36	27,31	32,83	11,60	6,44	3,20	3,49	1,54	5,61	4,80	3,6	9,02
2Ck	0,84	2,31	5,16	27,56	32,51	12,08	6,67	2,14	2,85	2,39	5,49	4,77	2,3	8,28
<b>Pedón 6</b>														
An	0,01	1,16	19,88	32,21	14,42	12,41	7,65	4,10	2,03	2,73	3,40	4,43	1,2	10,85
2Btssb	0,00	1,20	20,13	25,32	9,06	3,57	3,89	1,86	1,68	2,98	30,30	6,27	10,2	1,64
2Btkb	0,00	0,99	18,54	24,57	12,10	1,57	2,97	2,26	1,04	2,74	33,22	6,50	12,1	1,54
2BCKnxb	0,00	1,51	20,99	29,68	11,57	3,82	7,41	3,18	2,22	2,45	17,17	5,63	7,0	3,17
2BCnb	0,00	1,46	23,89	32,14	12,17	4,83	3,48	2,84	1,51	2,90	14,78	5,33	5,1	3,86
3Cn	0,07	1,99	35,55	43,71	7,32	2,61	1,85	1,64	0,94	1,50	2,82	3,43	1,9	20,03
<b>Pedón 7</b>														
A1	0,03	2,29	35,59	38,87	5,74	3,35	2,66	2,55	0,95	1,23	6,75	3,77	5,5	10,05
A2	0,03	1,01	36,72	40,67	6,65	2,51	2,18	1,19	1,65	0,78	6,62	3,57	8,5	11,36
A3	0,00	0,87	35,78	42,5	6,17	2,3	2,5	0,68	2,01	1,18	6,01	3,55	5,1	11,75
2AC	0,00	0,10	34,96	60,64	1,38	0,37	0,68	0,30	0,06	0,03	1,48	3,10	49,3	64,23
3C	0,04	0,97	39,07	45,44	5,38	1,87	2,08	0,66	0,10	0,59	3,80	3,23	6,4	20,48






**Tabla 2:** Cont  
**Table 2:** Cont..

$\mu\text{m}$ $\emptyset$	1000-500 0-1	500-250 1-2	250-125 2-3	125-62 3-4	62-31 4-5	31-16 5-6	16-8 6-7	8-4 7-8	4-2 8-9	2-1 9-10	<1 <10	Mz $\emptyset$	a/f/a,g	250-31/a,t
<b>Pedón 8</b>														
A	0,00	1,37	16,49	23,14	15,25	9,14	8,81	6,01	3,21	4,01	12,55	5,58	3,1	3,31
E	0,14	1,80	20,39	28,81	16,96	8,67	6,59	5,34	2,98	3,07	5,24	4,70	1,7	7,96
B <sub>tn</sub>	0,04	1,21	13,70	20,75	12,45	5,84	3,09	2,59	3,59	1,69	35,06	6,80	20,7	1,28
BC <sub>nxb1</sub>	0,04	1,41	14,05	23,86	13,75	5,55	5,53	4,71	6,34	1,46	23,29	6,35	16,0	2,09
2BC <sub>nxb2</sub>	0,04	1,88	17,39	29,66	15,66	6,03	1,98	3,20	3,79	2,43	17,94	5,80	7,4	3,08
3C <sub>n</sub>	0,00	2,49	28,44	35,99	15,12	4,67	1,37	0,78	2,14	1,59	7,41	3,82	4,7	8,84
<b>Pedón 9</b>														
A	0,00	0,45	15,79	30,45	12,06	10,11	8,07	6,00	3,93	3,50	9,64	5,23	2,8	4,44
AC	0,00	0,49	18,45	38,41	13,79	9,93	6,66	4,03	3,02	3,47	1,75	4,22	0,5	13,53
2B <sub>wb</sub>	0,06	0,49	16,34	33,27	13,76	6,92	5,10	3,33	2,43	3,22	15,08	5,53	4,7	3,46
3B <sub>ssb</sub>	0,00	0,44	16,24	27,69	10,00	4,85	3,51	1,48	1,88	3,95	29,96	6,47	7,6	1,59
3BC <sub>kxb</sub>	0,00	0,70	16,02	28,77	12,29	5,24	4,13	3,42	1,99	2,92	24,52	6,30	8,4	2,08
3C	0,01	0,53	17,00	30,62	14,36	5,65	3,18	2,98	3,45	0,80	21,42	5,93	26,8	2,79
<b>Pedón 10</b>														
A1	0,04	0,90	13,72	29,54	20,3	11,48	6,70	4,99	3,10	1,15	8,07	4,9	7,0	6,89
A2	0,00	0,99	14,22	30,42	19,59	12,02	5,33	7,29	0,06	2,81	7,27	4,33	2,6	6,37
B <sub>tnssb</sub>	0,08	0,67	7,87	18,12	13,37	6,68	3,60	3,85	1,07	0,40	44,29	7,47	110,7	0,88
2BC <sub>kxb</sub>	0,04	0,31	5,60	18,37	15,64	9,58	9,12	7,24	5,25	4,72	24,13	6,97	5,1	1,37
2CK	0,00	0,72	7,79	24,54	21,54	9,88	6,01	4,34	5,54	4,19	15,45	6,05	3,7	2,74

Referencias: a.f: arcilla < 1  $\mu\text{m}$ ; a.g: arcilla 1-2  $\mu\text{m}$ ; a.t: arcilla < 2  $\mu\text{m}$ ;  moda;  admixtura predominante; sd: sin determinar.



(P4-P6 y P8-P10). Asimismo, los horizontes iluviales con características frágicas (Btbx y BCbx) presentan tenores de arcilla total menores (6-29 %) que los horizontes iluviales no frágicos. No se descarta que algunos horizontes de P4 y P5, posean pseudopartículas de composición arcillo limosa, que afectan el resultado del análisis. La distribución vertical de las subfracciones es muy variable, tanto en cantidad como en tamaño, hecho que se condice con las características sedimentarias (discontinuidades litológicas) y pedológicas (horizontación), también variables de los perfiles. Esta variabilidad granulométrica debida a los distintos tipos de materiales de los suelos superficiales y paleosuelos subsuperficiales, con marcada horizontación, permite establecer las diferentes poblaciones granulométricas entre los mismos y corroborar la presencia de discontinuidades litológicas, como se ve en **Tabla 3** , donde se muestra la composición granulométrica en base no arcillosa (entre 1000 y 2  $\mu\text{m}$ ).



Para establecer una relación profundidad del suelo / tamaño de partículas es adecuado considerar una profundidad promedio de referencia para todo el conjunto de observaciones o perfiles de suelos estudiados. En nuestro caso, una profundidad promedio de 133 cm puede tomarse como línea de base de comparación entre todos los suelos estudiados. Así, se puede ver fácilmente, analizando los valores medios (Mz) **Tabla 2** <sup>\*2</sup>, que la granulometría no tiene un patrón definido y es heterogénea en el espesor analizado: a) Se hace más gruesa hacia arriba de la línea de base en los P1 y P10 (cambiando de intervalo de  $\emptyset$ ); b) Es levemente más gruesa en P3 y P9 (mismo intervalo  $\emptyset$ ); c) Es igual en P2 y d) Es más gruesa hacia abajo en los P4, P7 y P8 (cambio de intervalo de  $\emptyset$ ). Es decir, que hay variabilidad en cada caso o conjunto de casos. Esta relación profundidad / tamaño de partículas, generada por procesos geológico / pedológicos y observada en el campo entre los distintos horizontes de los suelos, posee importancia en caso de analizar la influencia de la textura de los mismos en el ascenso del nivel freático y su influencia en los procesos de anegamiento, como elemento conectivo entre el agua freática (zona saturada), agua del suelo (zona no saturada) y agua superficial (Aragón *et al.*, 2010).

**Modas.** Los suelos en general son unimodales con modas en AMF o LG en la mayoría de los suelos, salvo en el P4 y sección superior de P5, los que presentan la moda en AM **Tabla 2** <sup>\*2</sup> y **Figura 5** <sup>\*1</sup>.


En los pedones P1 y P2 (partido de Carlos Tejedor), y P3 (partido de Carlos Casares) del área occidental, la fracción modal es, en general, LG (62-31  $\mu\text{m}$ , 4-5  $\emptyset$ ), acompañada de una importante admixtura proximal gruesa (AMF). En cambio, en los pedones del área oriental (P4-P6, P8-P10) las fracciones modales son mayoritariamente AMF (125-62  $\mu\text{m}$ , 3-4  $\emptyset$ ), también acompañadas de una admixtura proximal gruesa (AF), salvo en P10, en que la moda está acompañada de una admixtura proximal fina (LG). En el P4 y los horizontes superficiales del P5 la moda es AM con admixturas finas, variables, que en algunos horizontes abarcan el intervalo desde AF hasta LG (250-31  $\mu\text{m}$ ). Los horizontes inferiores del P5 presentan una distribución semejante a la de los suelos más occidentales. Además, como ya se mencionó, en ambas áreas se observa una marcada concentración de partículas finas, menores a 1  $\mu\text{m}$ , principalmente en los horizontes B; esta fracción no se la considera modal, puesto que abarca varios intervalos granulométricos. Algunos perfiles presentan una moda secundaria muy poco significativa.

**Media gráfica.** La media gráfica (Mz) determina el tamaño promedio del material (Folk, 1954; Folk & Ward, 1957) los horizontes A de todos los suelos tienen Mz entre 4  $\emptyset$  y 5,6  $\emptyset$  (20 - 62  $\mu\text{m}$ ) correspondiente a las fracciones más gruesas del limo; en cambio, el horizonte A de la duna es el más grueso, Mz: 3,8  $\emptyset$  (AMF). Los valores medios son muy útiles para analizar las características granulométricas afec-

tadas por la pedogénesis. Todos los perfiles estudiados están constituidos por depósitos areno-limosos (Folk, 1954) pedogenizados en distinto grado, hecho que se manifiesta, tanto por los contenidos de las fracciones menores a  $2\text{ }\mu\text{m}$  como por los valores medios (Mz) de cada uno de los perfiles **Tablas 1**  **\*7** y **2**  **\*8**.

El material con menor valor de Mz (entre 3,1 y 3,8 Ø: intervalo 125-62  $\mu\text{m}$ , AMF) y menos pedogenizado corresponde al suelo desarrollado en una duna (P7), tomado como referencia, y a los horizontes C de P4, P6 y P8. En áreas interdunarias, los horizontes iluviales poseen entre 21 y 44 % de arcilla y valores de Mz de 6,6 Ø a 7,5 Ø (LF y LM) que corresponden a horizontes con marcada argiluvación, proceso también observado en el campo **Figura 3A-C-F-H-I**  **\*3** y en las secciones delgadas **Figura 10**  **\*1**. El mayor valor de Mz encontrado es de 7,47 Ø (P10) y el mínimo de 4,07 Ø (P3). Es destacable, como patrón general en cada perfil que los mayores valores de Mz se relacionan claramente con los horizontes de suelo que poseen mayor grado de diferenciación pedogénica vinculada al proceso de argiluvación, uno de los más difundidos en la Región Pampeana, y en la zona estudiada en particular (Imbellone *et al.*, 2010).

Los valores de Mz indican que estos materiales son más gruesos que los encontrados en la clásica sección de Luochuan (China), donde varían entre 5,17 Ø y 7,54 Ø; allí la mayoría cae entre 6,30 Ø y 7 Ø y en los paleosuelos es mayor a 7 Ø (Hu Biru & Lu Yanchou, 1985). Particularmente, estos autores establecen los siguientes valores promedios para los loess de China: loess arenoso, Mz: 4,93 Ø; loess arcillo limoso 5,6 Ø y loess arcilloso 6,05 Ø. En nuestros suelos los horizontes A tienen un promedio de 4,56 Ø, los horizontes Bt: 6,25 Ø y los horizontes C: 4,37 Ø. Otros valores de Mz encontrados para el E de Argentina son: Mz entre 4,72 Ø y 6,04 Ø (Teruggi, 1957), aunque en esos tiempos no se hacía discriminación entre horizontes pedogenizados o no; Kröhling & Orfeo (2002) encuentran en el loess de la región pampeana N y E, un tamaño medio de limo mucho más fino que el nuestro.


**Relación material grueso/fino ( $250\text{ }\mu\text{m}$ - $31\text{ }\mu\text{m}$ / $<2\text{ }\mu\text{m}$ ).** También se muestra en la **Tabla 2**  **\*4** una relación entre el material grueso ( $250\text{ }\mu\text{m}$ - $31\text{ }\mu\text{m}$ , AF, AMF, LG) y el material fino ( $<2\text{ }\mu\text{m}$ , arcilla total). Esta relación podría vincularse a: a) Transporte del material desde las áreas de origen, a nivel regional, o b) Grado de iluvación del material. El primer caso no es sencillo de explicar porque los procesos de transporte y depositación no son directos desde las áreas de origen hacia las áreas interdunarias donde, además de los procesos a macroescala, ocurren otros a mesoescala y locales entre áreas relativamente más altas y bajas del paisaje. De hecho, el material de las dunas parabólicas más recientes se habría formado por redeposición de material de las dunas longitudinales (Gardenal, 1986). El segundo caso es más sencillo de explicar porque los valores de la relación son el resultado de un proceso pedológico localizado, observable en cada pedón a través de los rasgos morfológicos.

Las tres subfracciones del numerador (AF, AMF, LG) son las más abundantes y variables en los horizontes de todos los perfiles de suelos; representarían la mayor parte del material correspondiente al sedimento original que llegó por agentes eólicos y/o ácueos; además, por su tamaño de partículas, no son movilizables en el perfil del suelo por los procesos pedológicos físicos de reordenamiento del sedimento.


En consecuencia, los valores menores de la relación mencionada corresponden a horizontes Bt; varían entre 1,2 y 2,8 en los suelos del área occidental y entre 0,9 y 1,9 en los suelos del área oriental, por lo que podríamos teorizar que en esta última zona los suelos presentan mayor grado de iluvación. Un caso


distinto es el Pedón 7 desarrollado en una duna cuyo menor valor es 10, ya que se trata de un suelo con escasa evolución pedológica, con mucho menor tenor de arcilla que los suelos muy evolucionados ubicados en los mantos planos e interdunas. También se observan valores mayores a 10 en algunos horizontes A y C de los Pedones 3, 4, 6 y 9 desarrollados en un material parental con alto contenido de material grueso y desarrollo pedológico comparativamente menor que el paleosuelo subyacente.



La capacidad de iluviación de un material depende de la distribución de tamaño de partículas de su matriz, es decir de la textura del suelo, que determina el tamaño de poros a través de los cuales se mueven las partículas iluviadas. Los suelos estudiados poseen clases texturales franca, franco limosa y franco arcillosa, denominadas texturas medias, que favorecen el proceso de argiluvación; las clases con mayor contenido de arena poseen espacio poral compuesto por vacíos de empaquetamiento más o menos continuos a través de los cuales pueden pasar un amplio intervalo de tamaño de partículas menores a 2  $\mu\text{m}$  y ocasionalmente menores a 8  $\mu\text{m}$ .

**Relación arcilla fina/arcilla gruesa.** **Tabla 2** \*. El contenido de arcilla de los suelos estudiados es muy variable. Si bien el valor alto de Mz coincide con el aumento de esa fracción, la relación arcilla fina/arcilla gruesa permite estimar con mayor certeza el grado de iluviación en el seno de cada suelo, ya que la arcilla fina posee mayor movilidad y por supuesto se concentra en los horizontes marcadamente iluviales de cada suelo. En los suelos estudiados la cantidad y variación de arcilla gruesa (2-1  $\mu\text{m}$ ) no es importante. En cambio, la arcilla fina (<1  $\mu\text{m}$ ) es abundante y más variable y el índice mencionado es numéricamente mayor en coincidencia con los valores de Mz mayores de 6 Ø. Naturalmente, alguna cantidad de arcilla sería original del sedimento, pero esta relación permite estimar el grado de movilidad del material tamaño arcilla por procesos pedogénicos.

La relación arcilla fina/arcilla gruesa se complementa con la relación material grueso/material fino analizada. Se verifica que hay correspondencia lógica entre los valores de ambos parámetros, que permiten estimar: a) El mayor contenido de material fino en un depósito o suelo (Mz y relación material grueso/material fino), y b) Mayor movilidad del mismo en el suelo (arcilla fina/arcilla gruesa). La relación general entre los parámetros analizados sería: a mayor valor de Mz: menor valor de la relación material grueso/material fino y mayor valor de la relación arcilla fina/arcilla gruesa.

**Discontinuidades litológicas.** Con respecto a la posibilidad de hipotetizar acerca de las características originales de los depósitos sedimentarios en que se desarrollaron los suelos, se recalcularon las subfracciones granulométricas sin la fracción arcilla **Tabla 3** \*, donde se muestra la composición granulométrica en base no arcillosa (entre 1000 y 2  $\mu\text{m}$ ).

Además, se graficaron (Pedones 2, 3, 4, 7, 10) **Figura 6**  las funciones profundidad de las fracciones y subfracciones que tienen mayor importancia en la granulometría, ya sea por: a) su cantidad, como por b) su variación en cada suelo: arena total (2000-62  $\mu\text{m}$ ), arena media (500-250  $\mu\text{m}$ ), arena muy fina (125-62  $\mu\text{m}$ ), limo total (62-2  $\mu\text{m}$ ), limo grueso (62-31  $\mu\text{m}$ ) y limo medio (31-16  $\mu\text{m}$ ). Ambas formas de expresión de los datos granulométricos muestran más claramente las variaciones del material con la profundidad, que cuando se analiza el material total que posee la composición del sedimento original afectado por pedogénesis.

Con respecto a las fracciones totales (AT, LT), se ve claramente **Tabla 3** \*, **Figura 6**  que en los suelos del área occidental (P1, P2 y P3) predomina el limo, en cambio en el área oriental, predomina marcadamente la arena en todo el perfil (P4, P6, P8, P9), al igual que en el suelo de la duna (P7), o es



**Tabla 3:** Distribución por tamaño de partículas en base no arcillosa.**Table 3:** Grain-size distribution on a clay-free basis

$\mu\text{m}$ $\phi$	1000-500 0-1	500-250 1-2	250-125 2-3	125-62 3-4	62-31 4-5	31-16 5-6	16-8 6-7	8-4 7-8	4-2 8-9	A tot %	lmo tot %	A tot/ l tot
<b>Pedón 1</b>												
A	0,00	0,23	9,05	26,13	23,60	16,42	11,31	7,36	5,90	35,41	64,59	0,55
2Btmb	0,25	0,30	5,44	19,18	23,71	15,95	14,89	11,45	8,83	25,17	74,83	0,34
2BCnb1	0,00	0,13	4,39	15,35	21,86	16,27	15,37	14,11	12,52	19,87	80,13	0,25
2BCnb2	0,48	0,47	4,90	17,33	25,38	17,84	12,82	10,71	10,07	23,18	76,82	0,30
3Btncxb	0,19	0,57	6,12	21,58	23,96	14,53	11,96	10,40	10,70	28,46	71,54	0,40
3BCkxb	0,05	0,36	7,64	24,88	26,24	13,13	9,67	8,85	9,17	32,94	67,06	0,49
<b>Pedón 2</b>												
A	0,15	1,12	12,41	33,55	20,54	12,74	9,33	5,35	4,81	47,23	52,77	0,90
2Ab	0,10	0,69	8,29	28,42	21,47	14,83	11,18	9,60	5,43	37,49	62,51	0,60
2ACb	0,19	0,65	6,27	24,52	23,46	15,74	12,26	9,06	7,85	31,64	68,36	0,46
3Btmb	0,17	0,48	4,33	19,69	25,35	16,64	13,89	9,35	10,10	24,66	75,34	0,33
3BCnb	0,09	0,34	3,47	17,23	24,64	19,43	15,41	11,45	7,95	21,13	78,87	0,27
4Btncxb	0,08	0,39	4,22	21,21	25,61	15,04	11,88	11,77	9,80	25,89	74,11	0,35
4BCnkxb	0,15	0,50	5,10	26,01	31,43	14,77	8,15	7,89	6,00	31,76	68,24	0,47
5C	2,37	2,16	5,89	31,83	24,24	12,63	8,67	6,67	5,54	42,25	57,75	0,73
5Ckm												
<b>Pedón 3</b>												
A	0,13	1,66	13,55	27,64	33,76	8,68	4,60	9,03	0,94	42,99	57,01	0,75
AC	0,07	1,65	11,68	28,72	39,44	7,36	5,29	3,48	2,32	42,12	57,88	0,73
C	0,01	1,49	10,37	29,57	39,64	7,11	5,28	3,56	2,97	41,44	58,56	0,71
2Btb	0,06	0,69	5,20	19,30	45,56	9,51	8,78	7,46	3,44	25,25	74,75	0,34
3Btkxb1	0,31	0,48	3,16	19,70	55,88	9,29	0,85	7,36	2,99	23,64	76,36	0,31
3Btkxb2	0,40	1,31	3,46	22,12	50,56	9,27	7,03	2,88	2,98	27,28	72,72	0,38
3BCb	0,07	0,42	2,65	22,95	58,97	6,05	3,85	2,60	2,44	26,09	73,91	0,35

\* 1  
\* 2

$\mu\text{m}$ $\varnothing$	1000-500	500-250	250-125	125-62	62-31	31-16	16-8	8-4	4-2	A tot %	límo tot %	A tot/ l tot
<b>Pedón 4</b>												
A	2,16	37,10	15,72	12,66	11,01	6,99	5,73	4,29	4,32	67,65	32,35	2,09
AC	2,85	39,74	19,04	10,40	11,17	5,67	4,48	4,44	2,20	72,03	27,97	2,58
C	2,53	42,87	19,92	11,36	10,82	4,64	2,99	3,46	1,41	76,68	23,32	3,29
2Bthb	1,96	29,66	13,64	13,73	14,30	7,93	6,48	5,18	7,13	58,98	41,02	1,44
2BCb	2,72	30,54	15,71	11,22	13,62	8,04	8,16	5,92	4,08	60,18	39,82	1,51
2BCkxb	5,30	22,49	16,10	18,03	18,38	9,11	5,48	3,15	1,94	61,93	38,07	1,63
2Ck	5,25	16,63	17,40	21,05	23,24	6,41	4,08	4,35	1,59	60,34	39,66	1,52
<b>Pedón 5</b>												
A	1,24	21,02	10,96	16,25	16,96	12,13	9,61	6,52	5,32	49,47	50,53	0,98
E	1,14	21,93	12,11	18,57	19,54	10,91	8,03	3,95	3,83	53,75	46,25	1,16
Et	1,00	18,92	11,95	21,78	24,30	10,20	6,02	2,22	3,61	53,65	46,35	1,16
2Btkb	10,57	8,00	5,96	21,27	24,13	11,50	8,25	6,20	4,13	45,79	54,21	0,84
2BCkxb	4,36	4,13	5,19	25,61	29,61	11,65	8,96	6,24	4,24	39,30	60,70	0,65
2C	0,81	3,09	4,70	29,41	35,36	12,49	6,94	3,45	3,76	38,01	61,99	0,61
2Ck	0,91	2,51	5,60	29,92	35,29	13,11	7,24	2,32	3,09	38,94	61,06	0,64
<b>Pedón 6</b>												
An	0,01	1,24	21,18	34,31	15,36	13,22	8,15	4,37	2,16	56,74	43,26	1,31
2Bhssb	0,00	1,80	30,18	37,96	13,58	5,35	5,83	2,79	2,52	69,93	30,07	2,33
2Bthkb	0,00	1,55	28,95	38,37	18,89	2,45	4,64	3,53	1,62	68,86	31,14	2,21
2BCkxb	0,00	1,88	26,11	36,92	14,39	4,75	9,22	3,96	2,76	64,92	35,08	1,85
2BCnb	0,00	1,77	29,02	39,04	14,78	5,87	4,23	3,45	1,83	69,84	30,16	2,32
3Cn	0,07	2,08	37,16	45,68	7,65	2,73	1,93	1,71	0,98	84,99	15,01	5,66
<b>Pedón 7</b>												
A1	0,03	2,49	38,67	42,24	6,24	3,64	2,89	2,77	1,03	83,43	16,57	5,03
A2	0,03	1,09	39,65	43,92	7,18	2,71	2,35	1,28	1,78	84,69	15,31	5,53
A3	0,00	0,94	38,55	45,79	6,65	2,48	2,69	0,73	2,17	85,28	14,72	5,79
2AC	0,00	0,10	35,50	61,57	1,40	0,38	0,69	0,30	0,06	97,17	2,83	34,30
3C	0,04	1,01	40,86	47,53	5,63	1,96	2,18	0,69	0,10	89,45	10,55	8,48



Tabla 3: Conti.

Table 3: Cont.

$\mu\text{m}$ $\varnothing$	1000-500 0-1	500-250 1-2	250-125 2-3	125-62 3-4	62-31 4-5	31-16 5-6	16-8 6-7	8-4 7-8	4-2 8-9	A tot %	lirno tot %	A tot/ l tot
<b>Pedón 8</b>												
A	0,00	1,64	19,77	27,74	18,28	10,96	10,56	7,20	3,85	49,15	50,85	0,97
E	0,15	1,96	22,24	31,42	18,50	9,46	7,19	5,82	3,25	55,78	44,22	1,26
Bln	0,06	1,91	21,66	32,80	19,68	9,23	4,88	4,09	5,67	56,43	43,57	1,30
BCnx1	0,05	1,87	18,67	31,71	18,27	7,38	7,35	6,26	8,43	52,31	47,69	1,10
2BCnx2	0,05	2,36	21,84	37,25	19,67	7,57	2,49	4,02	4,76	61,50	38,50	1,60
3Cn	0,00	2,74	31,25	39,55	16,62	5,13	1,51	0,86	2,35	73,54	26,46	2,78
<b>Pedón 9</b>												
A	0,00	0,52	18,18	35,06	13,88	11,64	9,29	6,91	4,52	53,75	46,25	1,16
AC	0,00	0,52	19,47	40,53	14,55	10,48	7,03	4,25	3,19	60,51	39,49	1,53
2Bwb	0,07	0,60	20,00	40,72	16,84	8,47	6,24	4,08	2,97	61,40	38,60	1,59
3Btssb	0,00	0,67	24,57	41,90	15,13	7,34	5,31	2,24	2,84	67,14	32,86	2,04
3BCKxb	0,00	0,96	22,08	39,65	16,94	7,22	5,69	4,71	2,74	62,69	37,31	1,68
3C	0,01	0,68	21,86	39,37	18,46	7,26	4,09	3,83	4,44	61,92	38,08	1,63
<b>Pedón 10</b>												
A1	0,04	0,99	15,12	32,54	22,36	12,65	7,38	5,50	3,42	48,69	51,31	0,95
A2	0,00	1,10	15,81	33,83	21,79	13,37	5,93	8,11	0,07	50,75	49,25	1,03
Btssb	0,14	1,21	14,23	32,76	24,17	12,08	6,51	6,96	1,93	48,35	51,65	0,94
2BCKnx	0,06	0,44	7,87	25,82	21,98	13,46	12,82	10,18	7,38	34,18	65,82	0,52
2Ck	0,00	0,90	9,69	30,54	26,80	12,29	7,48	5,40	6,89	41,13	58,87	0,70

Referencias:


moda:

admixtura predominante:






fracción predominante.

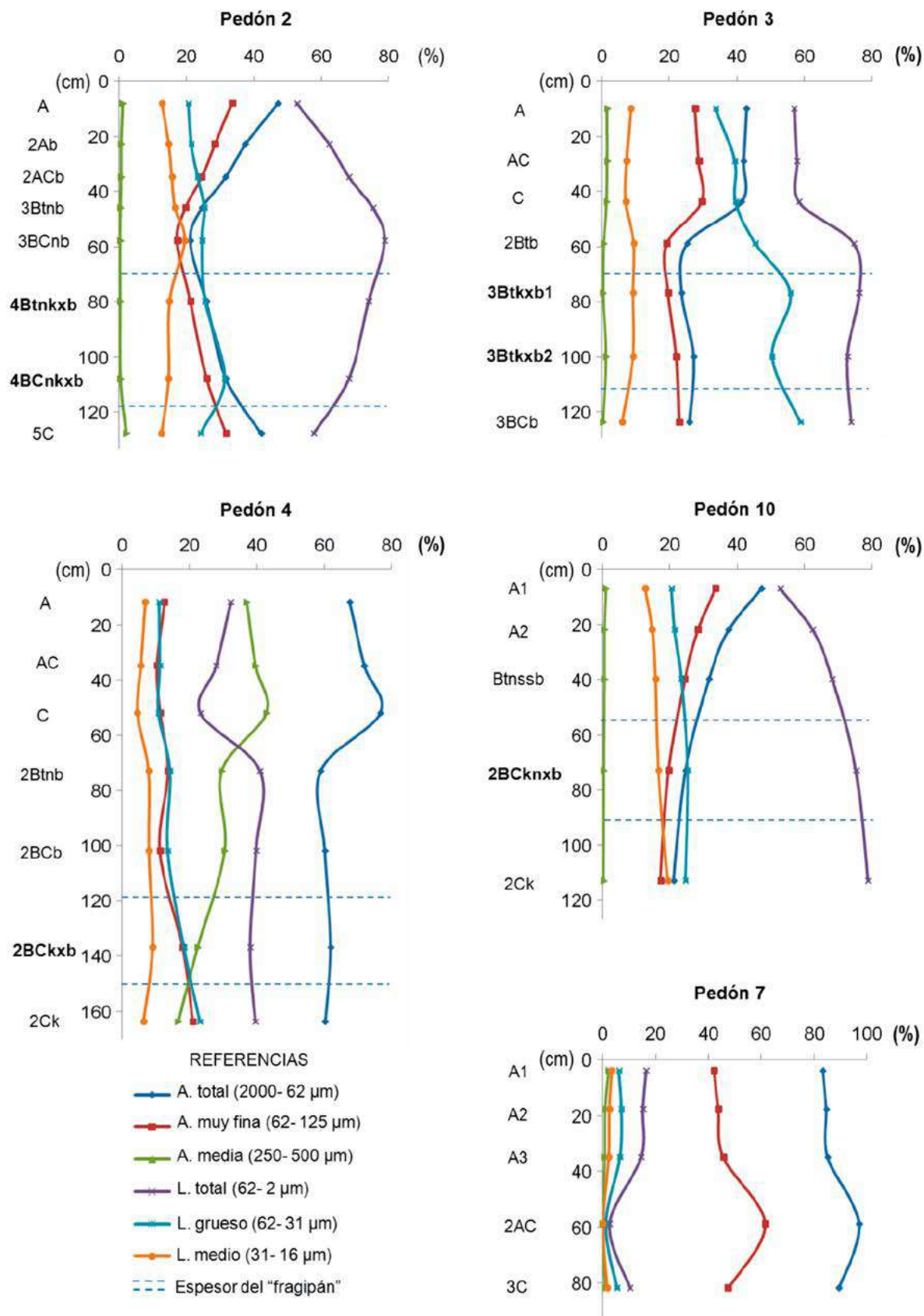
variable entre los ciclos pedológicos superiores e inferiores (P5). La forma de la función profundidad de AT está influenciada por el contenido de la AMF, excepto en el P4 influenciada por la AM. Este diseño en profundidad es inverso y variable con respecto al del LT; este último está influenciado por el LM y el LG.

Con respecto a las subfracciones AM, AF, AMF, LG y LM sin arcilla, se repite el comportamiento mencionado para el material total con arcilla, como era de esperar, ya que estas subfracciones gruesas no poseen movilidad vertical en el suelo. En casi todos los perfiles, las subfracciones que tienen mayor abundancia y variabilidad son de mayor a menor: AMF, LG y AF.

La AM está prácticamente ausente, excepto en P4 y P5 en los cuales, además de alcanzar tenores de hasta 43 %, posee variaciones en profundidad que indicarían discontinuidad litológica entre los horizontes C (43 %) y 2Bt<sub>nb</sub> (30 %) del P4, en correspondencia con una discontinuidad pedológica (Mz 2,8 y 6,1 Ø, respectivamente). La AMF es la subfracción mayoritaria de arena. Posee inflexiones y variaciones en profundidad que indicarían discontinuidades litológicas en P1, entre A y 2Bt<sub>nb</sub> y entre 2BC<sub>nb</sub>2 y 3Bt<sub>nb</sub>x<sub>b</sub>; en el P2 la AMF muestra variaciones porcentuales de alrededor del 5 %, coincidentes con las discontinuidades pedológicas. En ambos perfiles se observa una marcada inflexión en la función profundidad **Figura 6** \*1 entre los horizontes BC de un ciclo pedológico y los horizontes Bt del ciclo anterior. En P3, la AMF, al igual que otras subfracciones, experimenta una marcada inflexión acompañando una discontinuidad pedológica y litológica. En P6 se observan variaciones marcadas, tanto en el horizonte A como en el C. El P7 (duna) es un suelo de escasa evolución y la AMF marca claramente dos discontinuidades litológicas. En el P8 las discontinuidades quedan mejor expresadas por el contenido de arena total; si consideramos las subfracciones, es la AF más que la AMF, la que presenta mayor variación. Comportamiento similar se observa en P10.


El limo es abundante en todos los suelos, dominando el limo grueso, que tiene variaciones importantes en profundidad en P3 y P5; el limo fino posee una función casi lineal en todos los perfiles. En general, los porcentajes de las subfracciones de limo disminuyen a medida que disminuye el tamaño del limo.


Individualmente en cada perfil de suelo, las discontinuidades litológicas quedarían indicadas por los tenores absolutos y cambios de tendencia de las fracciones arena y limo totales **Tabla 1** \*3 con y sin arcilla y algunas subfracciones que tienen mayor influencia en la diferenciación del sedimento **Tablas 2**  y **3** , **Figura 6** \*1. En algunos casos, las discontinuidades litológicas quedan mejor indicadas por la granulometría total (arena total y limo total) que por las subfracciones. Esto acontece cuando la diferencia cuantitativa indicativa de discontinuidad sedimentaria (10% establecida por nosotros) no está dada por una única subfracción, sino que surge de la suma de tenores distribuidos en varias subfracciones que individualmente no son determinativas (Pedones 1, 2, 6 y 10). Un hecho importante es que, en la mayoría de los casos, las “discontinuidades granulométricas” coinciden con las “discontinuidades de campo” marcadas por los rasgos morfológicos, sobre todo tipo de horizonte, color, límite y consistencia. Un caso particular, son los Pedones 5 (Albacualf aérico) y 8 (Natrálbol típico) que presentan un grado de pedogénesis muy avanzado **Figura 3D** \*4. Posiblemente en estos suelos el proceso de pedogénesis fue tan intenso, como indica su morfología y grado de desarrollo pedológico, que enmascara las propiedades de los sedimentos originales, los cuales poseerían cierta similitud al ser generados por redeposición de materiales; los pedones mencionados poseen horizontes E fuertemente eluviados (Mz: P5: 4,6 Ø



**Figura 6:** Funciones profundidad de las fracciones y subfracciones: arena total, arena muy fina, arena media, limo total, limo grueso y limo medio sobre base no arcillosa.

**Figure 6:** Depth functions of the following separates: total sand, very fine sand, medium sand, total silt, coarse silt and medium silt (clay-free basis).

y P8: 4,7 Ø) en relación con los horizontes Bt infrayacentes (Mz: P5: 6,93 Ø y P8: 6,80 Ø). En P5 **Tabla 3** <sup>\*2</sup>, habría una discontinuidad granulométrica entre el Bt y 2Btkb en las fracciones AG y AM y en P8 en la fracción AF entre los horizontes 2BCnxb2 y 3Cn. En el primero no se detectó por la morfología del suelo, ni por las fracciones totales y es más visible en los índices; en cambio en P8, no es visible en la morfología, pero sí por las fracciones granulométricas totales.

**Granulometría de los horizontes frágicos.** En la mayoría de los casos, los horizontes frágicos (Btx y BCx) son ligeramente más gruesos (Mz promedio 6,02 Ø) que los horizontes B suprayacentes sin propiedades frágicas **Tabla 2** <sup>\*6</sup>. El tamaño medio mayoritario en los distintos perfiles está en los intervalos 62-31 µm (4-5 Ø), 31-16 µm (5-6 Ø) y 16-8 µm (6-7 Ø), comprendidos en la clase textural franco limosa, con algunas variaciones en los pedones de la zona oriental. Otros, ligeramente más arcillosos, también en el intervalo 16-8 µm (6-7 Ø), pertenecen a las clases texturales franco arcillo arenosa y franco arcillosa. Similarmente, los horizontes Bt sin propiedades frágicas pertenecen a clases texturales franco limosa y franco arcillosa y el Mz promedio en los horizontes Btb es 6,50 Ø.

**Material originario.** El loess es el material originario de la mayoría de los suelos de la Región Pampeana y de los suelos desarrollados en las zonas interdunarias. La información acerca de su naturaleza, implicaciones paleoclimáticas y pedológicas es muy vasta, ya sea nacional (Teruggi, 1957; Imbellone & Teruggi, 1993; Zárate & Tripaldi, 2012 y trabajos allí mencionados), como internacionalmente (Pye, 1995; Vandenbergue, 2013; Wang *et al.*, 2017, entre otros). Los resultados de la distribución por tamaño de partículas obtenidos en este trabajo, desde el partido de Carlos Tejedor hasta el partido de Roque Pérez, muestran que el material que constituye los suelos se halla dentro de los límites establecidos para el “loess arenoso” (Pye, 1987). Tomando como referencia los intervalos de los distintos tipos de loess dados por el autor mencionado, el “loess típico”, posee una moda pronunciada en el intervalo entre 20-40 µm (5,7-4,65 Ø) con hasta 10 % de arena fina (>63 µm); cuando este contenido de arena supera el 20 %, como en nuestro caso, es apropiado denominarlo “loess arenoso”.

En los suelos estudiados el requisito de moda pronunciada en la fracción más gruesa del limo y 20 % de arena en la fracción mayor a 63 µm se reúne en la mayoría de los casos; este valor se supera ampliamente en la subfracción AMF, que es la más abundante en nuestros suelos, y más aún, en todos los casos sumándole la subfracción AF, aunque esta última no es modal en ningún suelo. Por lo tanto, consideramos que todos los suelos se desarrollan en loess arenoso, aún los más occidentales, donde la moda es variable entre AMF y LG.

El intervalo entre 20 y 40 µm, mencionado por Pye (1987) quien trabaja con loess típico, abarca en nuestra escala granulométrica dos intervalos de limo: parte de limo grueso (62-31 µm, 4-5 Ø) y parte de limo medio (31-16 µm, 5-6 Ø). Ninguno de nuestros suelos tiene modas entre 5 y 6 Ø. En cambio, los tres suelos del área Oeste poseen un valor medio 4,3 Ø (62-31 µm) y 5,2 y 5,4 Ø (31-16 µm) en los horizontes superficiales A; en los horizontes C más profundos es variable entre 4,1 y 6,6 Ø. Asimismo, en estos suelos algunos horizontes poseen más de 20 % de AMF.

También es posible hacer una comparación entre los suelos estudiados y los valores clásicos de phi (Ø) dados en la literatura para el denominado por Pye (1987) “loess meteorizado” (loess primario cuyas características sedimentarias han sido modificadas por meteorización, formación de suelos y diagénesis). Generalmente, está descalcificado y posee más del 60 % de arcilla que el no meteorizado. Estos loess meteorizados pueden representar un único perfil de suelo formado durante un hiatus en la



sedimentación del loess o constituir, como en nuestro caso, el solum de varios paleosuelos superpuestos conocidos como pedocomplejos y formados durante una deposición de polvo lenta y/o intermitente.

El material que forma los suelos se puede analizar separadamente por el comportamiento de los granos ante la acción del viento (transporte del material original), área de origen del material originario y, por otro lado, el comportamiento de los mismos ante los procesos pedogenéticos, que en nuestro caso son principalmente argiluviación, hidromorfismo y carbonatación.

**Transporte y comportamiento de los sedimentos.** Los depósitos eólicos son transportados por distintos mecanismos, según su granulometría y la velocidad de arrastre del viento (Tsoar & Pye, 1987). Los materiales de tamaño limo medio y grueso son transportados en niveles bajos de la atmósfera y son retenidos por trampas de vegetación e irregularidades topográficas. El limo grueso sería transportado en suspensión en trayectos cortos y evidenciaría un área de aporte cercana. El limo medio puede ser transportado en suspensiones cortas y largas y los sedimentos más gruesos (arenas) por los mecanismos de rodamiento y saltación. El limo fino y la arcilla son transportados en suspensiones largas, salvo que sean movilizados como agregados mayores. Un alto contenido de estas fracciones finas indica menor velocidad del viento, grandes distancias de transporte y/o un incremento de agregados sedimentarios.

Otros autores (Hu Biru & Lu Yanchou, 1985) establecen que los granos mayores a 300  $\mu\text{m}$  sólo pueden ser transportados por saltación; entre 300 y 70  $\mu\text{m}$  son muy dificultosos de transportar en suspensión; entre 50 y 10  $\mu\text{m}$  son levantados fácilmente y transportados por el viento, fracción denominada "*fracción básica del polvo eólico*"; entre 10 y 5  $\mu\text{m}$  son poco levantables y poco dispersables y este intervalo se denomina "*fracción adicional*", pues se comprobó que proviene del área de aporte pegada a la superficie de los granos de limo grueso. Finalmente, aquellos menores de 5  $\mu\text{m}$  no pueden ser levantados por el viento y también vienen adheridos al limo.

Considerando los tamaños antes mencionados, cabría generalizar para los suelos estudiados:

- Los granos transportados por saltación ( $>300 \mu\text{m}$ ) son muy escasos, excepto en el Pedón 4 y parte superior del Pedón 5 (partido de Saladillo), que seguramente provendrían de removilización local.
- Los granos muy difíciles de transportar en suspensión (300-70  $\mu\text{m}$ ), son abundantes en los suelos de los partidos de Saladillo (Pedón 6) y Roque Pérez (Pedones 7, 8, 9 y 10) y también tendrían un fuerte componente local, tanto en la duna como en áreas interdunarias.
- Los granos de tamaño entre 50 y 10  $\mu\text{m}$ , fácilmente transportables en suspensión, son abundantes en la fracción más gruesa del intervalo (31-63  $\mu\text{m}$ ), en todo el perfil de Carlos Casares (Pedón 3) y algunos horizontes de Carlos Tejedor (Pedones 1 y 2) y en este caso habría alguna participación en suspensión.
- Los granos entre 5 y 10  $\mu\text{m}$ , escasamente levantables y dispersables, son escasos en todos los suelos y corresponderían a las fracciones más finas del limo.
- De los granos  $<5 \mu\text{m}$ , que viajan adheridos a la superficie de los granos de limo grueso, son marcadamente abundantes los correspondientes a arcilla fina ( $<1 \mu\text{m}$ ) ya que la arcilla gruesa (1-2  $\mu\text{m}$ ) es escasa.

Habida cuenta de las consideraciones precedentes, no es fácil ni adecuado vincular los resultados obtenidos en nuestro trabajo solamente con el comportamiento de las partículas ante la acción del viento, determinado en túneles de viento. Esto se debe a que los intervalos de tamaño de partículas considerados en los trabajos experimentales citados no son iguales a los nuestros, y más importante aún, porque en el ambiente natural de nuestra zona hay participación conjunta y en distinto grado de agentes eólicos y ácueos de transporte. Con respecto al primer agente, y de una manera general, se

puede decir que nuestros suelos poseen más limo grueso que fino, más arcilla fina que gruesa y gran cantidad de partículas menores a 1  $\mu\text{m}$  que no podrían ser levantados por el viento. Los mecanismos probables principales serían saltación modificada, algo de saltación pura, algo de suspensión leve y escasa suspensión prolongada. Podría pensarse que la abundancia de esta arcilla fina se ha liberado por el pretratamiento, en caso de estar adheridas al limo. Este mecanismo no parece acertado porque la mayor concentración está vinculada preferencialmente a los horizontes B. Tampoco sería probable que toda la arcilla fina se haya formado por alteración porque el clima no es adecuado para una concentración de tal magnitud. Lo más razonable es pensar en procesos geomórficos superficiales por los cuales gran parte del material más fino es arrastrado en suspensión acuosa, depositado superficialmente después de los anegamientos y luego iluviado por pedogénesis. Una evidencia actual del último proceso mencionado es la intensa relación iluviación/eluviación evidenciada en dos de los suelos (Pedones 5 y 8).


Los suelos analizados en este trabajo están situados en un ambiente general denominado “Sistema Eólico Pampeano”, pero en su evolución geomórfica/pedológica local interdunaria, habría una acción combinada de agentes eólicos y ácuos, sobre todo en los ambientes planos y deprimidos afectados por episodios de anegamiento anual y plurianual, como lo indican numerosos trabajos vinculados a la dinámica hídrica en base a registros directos y/o estimaciones (Aragón *et al.*, 2010; Kuppel *et al.*, 2015; Taboada *et al.*, 2009).

El área de origen de los sedimentos de nuestros suelos está establecida en trabajos geomorfológicos: pulsos de deflación de los depósitos fluviales del Desaguadero acaecidos durante períodos secos del último máximo glacial, por vientos de dirección O-SO y depositados en corredores estructurales (Iriondo & Kröhling, 1995; Zárate & Tripaldi, 2012, etc); serían depósitos de deflación provenientes del retrabajo de anteriores depósitos eólico/fluviales. Por lo tanto, no es posible establecer una relación directa entre el tamaño de grano y la distancia de origen, que en nuestros suelos estaría estimativamente a 300 km de distancia de los del área occidental y a 600 Km de distancia de los del área oriental.

**Granulometría y distribución del agua.** En la Pampa Arenosa se registran importantes y episódicos eventos de anegamiento en épocas históricas y recientes, como por ejemplo en 2001, recientemente estudiados en detalle por Aragón *et al.* (2010) y Kuppel *et al.* (2015) a nivel regional principalmente. Los primeros autores trabajan en la Pampa Arenosa y establecen que durante los períodos de anegamiento existe una conectividad vertical entre el agua superficial y la capa freática, como también una conectividad entre los cuerpos de agua superficial, que durante los anegamientos se interconectan superficialmente. En este modelo regional no sabemos como actúan localmente las capas restrictivas a la conductividad hidráulica, ya sean horizontes fuertemente iluviales y/o con propiedades frágicas. Analizando la fluctuación freática registrada en áreas bajas por esos autores (en promedio 2,5 m) tenemos: para Carlos Tejedor: profundidad máx. -2,35 m, mín. -1,17 m y en Carlos Casares: máx. -2,74 m, mín. -1,46 m (Aragón *et al.*, 2010). Kuppel *et al.* (2015) establecen para la zona occidental que la profundidad de la capa freática está entre 1,0 y 1,5 m, cuando la cobertura superficial de agua está entre el 10 y el 20 %. En las áreas interdunarias de este trabajo se indica que el horizonte frágico en Carlos Tejedor se encuentra a 67 cm de profundidad, con espesor de 56 cm en P1, y a 64 cm de profundidad con espesor de 54 cm en P2; en Carlos Casares (P3) está a 68 cm de profundidad, con espesor de 18 cm; adicionalmente, hay varios horizontes fuertemente iluviales suprayacentes. En la zona oriental los horizontes con propiedades frágicas poseen profundidad y espesor más variable.





Considerando los datos precedentes, es posible teorizar que el ascenso del nivel freático regional alcanzaría a la base de los horizontes frágicos y horizontes iluviales enterrados en períodos normales; en períodos de excesos de agua moderados dicho nivel quedaría confinado en profundidad por este tipo de horizontes, protegiendo a los horizontes superiores de la salinización producida por el ascenso del agua freática, generalmente cargada de sales que producen salinización y sodificación (Taboada *et al.*, 2009). El exceso de agua superficial pluvial y de escurrimiento, con menor salinidad, favorecería los procesos de iluviación en los suelos generando suelos como los Pedones 5 y 8.

La textura de los horizontes B frágicos es franco limosa y la de los B suprayacentes es franco arcillo limosa o franco arcillosa. Si bien las texturas no son particularmente restrictivas, no podemos establecer la influencia de estos horizontes en la conectividad hídrica vertical dentro del perfil de suelo. Posiblemente la macro- y microestructura tenga mayor influencia. En suelos con horizontes frágicos de texturas semejantes a las nuestras (franco arcillo limosos), McDaniel *et al.* (2008) encontraron que poseen resistencia a la ruptura extremadamente firme en húmedo y las raíces en el horizonte frágico están limitadas a vacíos planares entre los agregados; además poseen poca continuidad poral entre los agregados, sugiriendo que los vacíos interpedales representan el camino principal del movimiento vertical de agua. La conectividad antes establecida (Aragón *et al.*, 2010) no estaría influenciada por los parámetros mencionados ni por la heterogeneidad pedológica de las áreas interdunarias; cuando el fenómeno de inundación es muy intenso hay influencia regional conjunta de la capa freática y el agua superficial **Figura 6** \*2 en Aragón *et al.* 2010).

Por lo expuesto, sería interesante establecer la influencia hidropedológica de los horizontes con propiedades frágicas y paleosuelos de la zona de interdunas, específicamente, en el desplazamiento vertical del agua, mediante monitoreo estacional de capas colgadas, medición de conductividad hidráulica saturada, almacenamiento de agua, escurrimiento superficial, flujo subsuperficial lateral, etc. (McDaniel *et al.*, 2008) y mostrar la interacción entre la pedología y los procesos hidrológicos a distintas escalas en la zona no saturada (Lin, 2003; Wilding & Lin, 2006).

## Mineralogía de arcillas

El análisis de la mineralogía de arcillas de tres suelos de los partidos de Carlos Tejedor, Saladillo y Roque Pérez, procedentes de trabajos anteriores (Camilión & Imbellone, 1984; Giménez *et al.*, 1996) y la nueva información de este trabajo **Figura 7**  y **Tabla 4** , permiten establecer las características generales de la mineralogía de arcillas de los suelos de la franja de la Pampa Arenosa estudiada. Todos ellos corresponden a suelos de interdunas ubicados en áreas ligeramente altas (Argiudol, perfil no mostrado) o bien en áreas planas adyacentes a depresiones (Natruoles abrápticos: P1 y P2; Epiacuol tapto-nátrico: P4 y Natracualf vértico: P10).

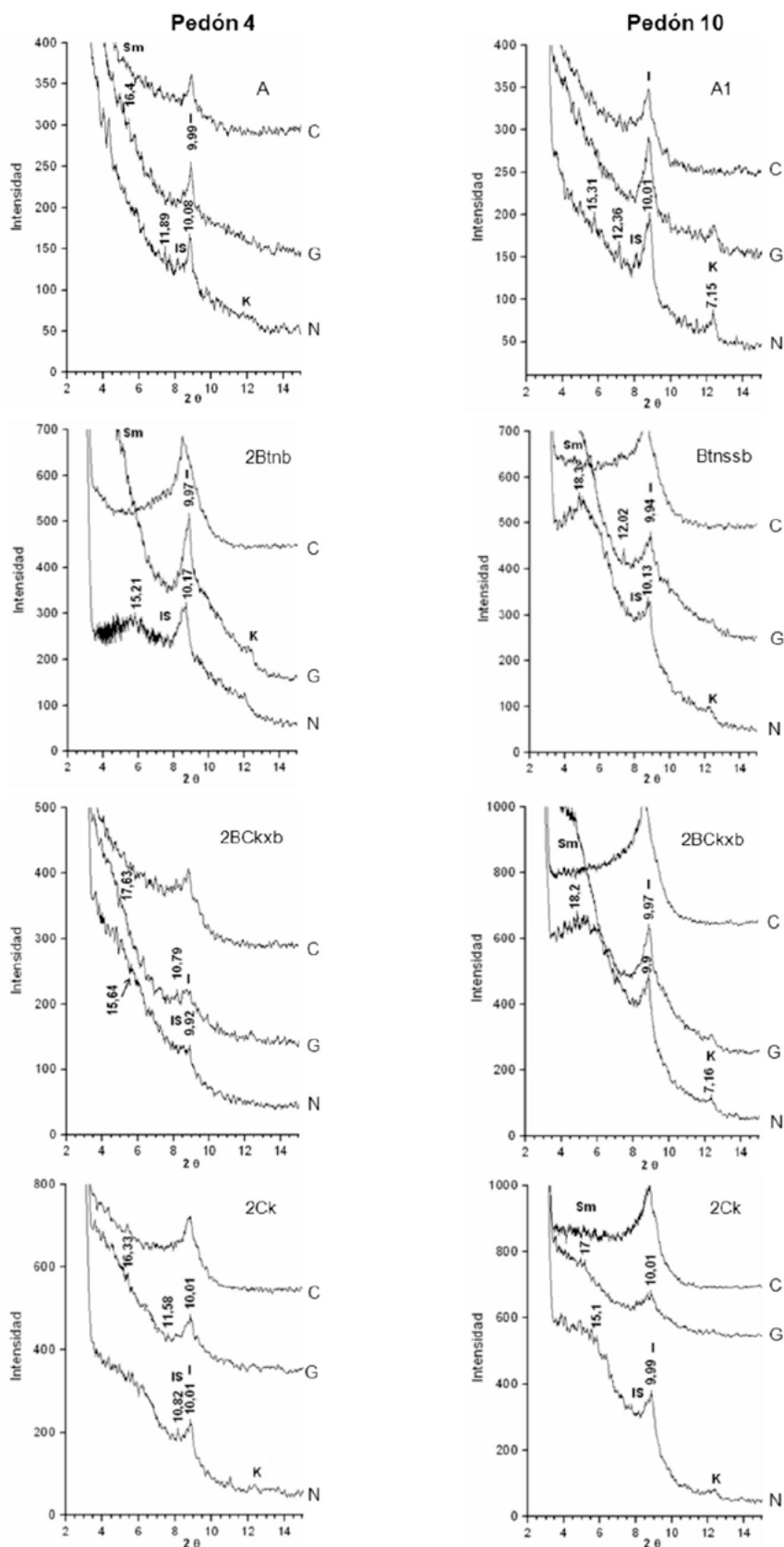
La asociación de especies minerales arcillosas del área estudiada es semejante a la encontrada en trabajos sobre suelos desarrollados en sedimentos loésicos pampeanos, tanto en suelos actuales -Molisoles (Imbellone *et al.*, 2012), Alfisoles y Vertisoles (Imbellone & Mormeneo, 2011)- como en sucesiones suelo-paleosuelos de la Pampa norte (Kröhling & Orfeo, 2002), etc.

La mineralogía de arcillas muestra que, al menos hasta la profundidad de observación (aproximadamente 130 cm), hay uniformidad composicional, con algunas variaciones porcentuales entre horizontes. Los argilominerales identificados son illita, expandibles más interestratificados y caolinita en orden

decreciente de abundancia. La primera es marcadamente más abundante en los horizontes eluviales (entre 70 y 80 %), con picos de reflexión bien definidos, lo que indica que los aportes sedimentarios más modernos están enriquecidos en ese argilomineral y/o que en los paleohorizontes iluviales la illita grada a interestratificados expandibles. De todas maneras, los contenidos en la fracción <2 mm son generalmente menores al 10 %, salvo en horizontes con alrededor de 30 a 40 % de arcilla total en los que alcanza tenores cercanos 20 % en la masa del suelo.

Los minerales expandibles forman parte de interestratificados irregulares, esmectita-illita; presentan picos de reflexión difusos, escalonados en un amplio intervalo de valores angulares y con falta de periodicidad en los espaciados, mostrando desplazamiento hacia los ángulos menores e incremento de área frente a la glicolación. La caolinita es escasa con reflexiones pobremente identificables.

Desde el punto de vista genético es importante analizar la composición y tenores de arcilla referidos a la fracción <2  $\mu\text{m}$ , que representan la arcilla heredada del sedimento original más la generada en el suelo. En cambio, los contenidos referidos a la fracción <2 mm



**Figura 7:** Difractogramas de rayos X de horizontes seleccionados de: Epiacul tpto-nátrico (P4) y Natracualf vértico (P10).


**Figure 7:** X-ray diffractograms of selected horizons of Pedon 4 (Thapto-natric Epiacquoll) and Pedon 10 (Vertic Natraqualf).

reflejan mejor el comportamiento de los suelos. Un ejemplo es el horizonte Btnssb del Pedón 10, que posee alto contenido de expandibles en esta fracción (26 %) y rasgos vérticos bien expresados, ausentes en los otros horizontes Bt, en los cuales dichos valores son mucho menores.

La variación de los tenores de especies arcillosas  $<2\ \mu\text{m}$ , entre los horizontes del suelo, puede deberse a: a) Variación mineralógica del material original si el suelo posee estratificación del mismo (discontinuidades litológicas), y en ese caso sería heredada. b) Procesos de transformación y/o neogénesis pedológica de la arcilla original del sedimento. c) Acumulación de arcilla por iluviación (estratificación pedológica u horizontación) o d) Combinación de orígenes. En la fracción arcilla  $<2\ \mu\text{m}$  se observan variaciones de los tenores de especies mineralógicas entre horizontes de alrededor del 10-15 % y otras más marcadas, alrededor del 30%, y no es posible establecer su origen con exactitud.

En suelos monogenéticos estas variaciones se atribuyen a mayor alteración de las especies mineralógicas y/o iluviación por procesos pedogenéticos. En los horizontes iluviales suele encontrarse aumento de expandibles más interestratificados en detrimento de la cantidad de illita, ya que ésta puede transformarse en minerales expandibles que se iluvian diferencialmente por su menor tamaño en el proceso de argiluvación; así los minerales expandibles suelen ser más abundantes en los horizontes iluviales. Los suelos estudiados son poligenéticos y estratificados, algunos horizontes no son comparables entre sí porque pertenecen a distintos ciclos pedológicos; por tanto, los tenores de illita registrados, podrían ser heredadas de los distintos materiales de aportes sedimentarios, y/o pedogénesis anteriores.

En la zona estudiada, debido a las características de clima húmedo/semiárido y templado/frío, del Holoceno y Pleistoceno tardío, los procesos de alteración de minerales primarios y formación de secundarios habrían sido moderados y poco evidentes (Morrás, 2016), por lo cual gran parte de la arcilla de estos suelos sería heredada. Por otra parte, se muestra en este trabajo que algunos paleohorizontes son fuertemente iluviales. No se descarta que algunas variaciones entre horizontes podrían provenir de imprecisiones del método semicuantitativo, pero hay otras, entre 30 y 40 %, que posiblemente sean diferencias sedimentario-pedológicas. No obstante, no es posible establecer discontinuidades litológicas considerando la fracción arcilla de los suelos.

Tomando en cuenta algunas variaciones en el contenido de illita, especie mayoritaria en la fracción  $<2\ \mu\text{m}$  en estos **Tabla 4**  y otros suelos de la Región Pampeana, podríamos hacer el siguiente análisis:

*Pedón 1.* Entre los horizontes A y 2Btbn hay 13 % de decrecimiento entre los tenores de illita, paralelamente a un 15 % de aumento de expandibles y a su vez 18 % de incremento entre los valores de arcilla total. En este caso ya se estableció una discontinuidad litológica y pedológica. Entre 2BCnb2 y 3Btbnxb hay 43 % de decrecimiento en el contenido de illita en la fracción arcilla y 49 % de aumento de expandibles más interestratificados, además de 8,5 % de aumento en el contenido de arcilla total. Aquí también se había establecido la heterogeneidad sedimentológica y pedológica. Posiblemente, este decrecimiento de illita en la fracción arcilla se deba a la discontinuidad litológica y el aumento de expandibles a la discontinuidad pedológica, por tratarse de un horizonte Bt.

*Pedón 2.* Entre 3Btbn y 3BCnb hay 14 % de disminución en el contenido de illita y a su vez 13 % de aumento de expandibles y 17,3 % de disminución de arcilla total. Los horizontes pertenecerían a un mismo material originario y al mismo ciclo pedológico; posiblemente la diferencia se deba a diferenciación pedológica ya que el grado de iluviación es mayor en el primero.

**Pedón 4.** Entre A y AC hay 18 % de disminución en el contenido de illita y 15 % de aumento de expandibles con 1,5 % de disminución de arcilla total. No hay discontinuidad litológica. En el resto del perfil los tenores de illita y expandibles son poco variables en la fracción arcilla, aunque hay aumentos importantes, del orden de cerca de 30 %, en los tenores del contenido de arcilla en el suelo, posiblemente por iluviación en el paleohorizonte B.

**Tabla 4:** Estimación semicuantitativa de minerales de arcilla.

**Table 4:** Semi-quantitative estimate of clay minerals.


Horizonte	Prof.  (cm)	Fracción <2 μm			Fracción <2 mm			Arcilla total
		I	E	K	I	E	K	
		%						
Pedón 1								
A	0-18	80	15	5	9	2	1	11,2
2Bt <b>nb</b>	18-38	67	30	3	20	9	1	29,2
2BC <b>nb</b> 1	38-53	65	32	3	15	8	1	23,7
2BC <b>nb</b> 2	53-67	83	10	3	15	2	1	17,5
3Bt <b>nkxb</b>	67-80	40	59	1	10	15	vest	26,0
3BC <b>kxb</b>	80-123+	58	40	2	15	10	1	25,2
Pedón 2								
A	0-16	80	10	10	11	1	1	13,4
2A <b>b</b>	16-30	85	10	5	15	2	1	18,2
2A <b>Cb</b>	30-40	75	20	5	9	3	1	12,6
3Bt <b>nb</b>	40-52	71	27	2	20	8	1	28,8
3BC <b>nb</b>	52-64	57	40	3	7	5	vest	11,5
4Bt <b>nkxb</b>	64-96	58	40	2	12	8	vest	21,1
4BC <b>nkxb</b>	96-118	48	50	2	12	12	vest	24,5
5C	118-137	49	47	4	6	5	vest	11,5
5C <b>km</b>	137-140+	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd
Pedón 4								
A	0-25	82	17	1	7	1	vest	8,9
AC	25-45	64	32	4	5	2	vest	7,4
C	45-60	62	33	5	2	1	vest	3,1
2Bt <b>nb</b>	60-85	62	35	3	20	11	1	31,7
2BC <b>b</b>	85-119	60	38	2	7	4	vest	11,0
2BC <b>kxb</b>	119-156	64	32	4	2	1	vest	3,3
2C <b>k</b>	156-171+	62	37	1	3	2	vest	5,0
Pedón 10								
A1	0-15	75	17	8	7	2	1	9,2
A2	15-28	85	11	4	9	1	vest	10,1
Bt <b>nssb</b>	28-52	41	57	1	18	26	1	44,7
2BC <b>knxb</b>	52-95	58	40	2	17	12	1	28,9
2C <b>k</b>	95-130+	73	26	1	14	5	vest	19,6


Referencias. I: illita; E: expandibles + interestratificados; K: caolinita.





*Pedón 10.* Entre A2 y Btnssb hay 44 % de disminución en los tenores de illita y marcado aumento de expandibles, coincidente con un aumento de arcilla total del 34,6 %. Entre 2BCknxb y 2Ck hay 15 % de aumento entre los tenores de illita y disminución del contenido de expandibles, como también disminución de 9,3 % entre el contenido de arcilla total. Estas variaciones parecen razonables ya que en el primer par de horizontes las diferencias tan marcadas podrían deberse a aumento relativo de expandibles por iluviación y en el segundo, por tratarse de un pasaje al horizonte C, rico en illita.


### Propiedades morfológicas de los horizontes frágicos (Btxb; BCxb).

En la **Tabla 1** \*4 se muestran las propiedades morfológicas de los suelos incluyendo los horizontes con propiedades frágicas (Bx y BCx) que, en los trabajos más modernos de la zona de trabajo, se indican como pertenecientes a ciclos pedológicos antiguos (Cantú *et al.*, 1997; Giménez *et al.*, 1996; Imbellone & Giménez, 1998; Imbellone *et al.*, 2004); en ningún caso se hallaron horizontes con propiedades frágicas en los horizontes E como se menciona en la bibliografía (Miller *et al.*, 1993), aunque aquellos están presentes, como horizontes iluviales profundos en suelos con horizontes E (P5 y P8), partidos de Saladillo y Roque Pérez, respectivamente.





Los horizontes con propiedades frágicas de la zona estudiada, presentan una morfología que difiere totalmente de la mencionada precedentemente como clásica (Grossman *et al.*, 1959; Grossman & Carlisle, 1969; Payton, 1992; Lindbo *et al.*, 2000; Szymański, *et al.*, 2011, entre otros) en distintos lugares del mundo (ver Giménez *et al.*, este libro). Al igual que los descriptos por Miller *et al.* (1993), en los suelos estudiados los horizontes frágicos están en suelos muy evolucionados, con fuerte diferenciación de horizontes y alto grado de iluviación, pero en nuestro caso no se observan lenguas eluviadas blanquecinas como tampoco estructura poligonal superficial (Smalley *et al.*, 2016); sólo en un caso (P5, partido de Saladillo) existe cierta semejanza en el perfil por la presencia de lenguas blanquecinas, indicadoras de fuerte eluviación, aunque estos rasgos no se encuentran en los horizontes frágicos **Figura 3E** \*5. También hay que tener en cuenta que muchos de los suelos con la morfología descrita en la bibliografía corresponden a suelos donde actúan procesos pedológicos distintos de los nuestros, son más ácidos y poseen vegetación arbórea.





**Profundidad y espesor.** Los horizontes frágicos se presentan entre 46 y 156 cm de profundidad, con espesores entre 8 y 75 cm. A lo largo de la franja estudiada hay variaciones de potencia y profundidad del techo **Figura 2** \*1. Se observan diferencias entre la subregión de las dunas longitudinales al O y las parabólicas al E. En la primera, tales dimensiones tienen pocas variaciones en los Pedones 1, 2 y 3. Así, el techo varía entre 64 y 68 cm de profundidad y el espesor entre 47 y 56 cm. En cambio, en la región de las dunas parabólicas (Pedones 4-6, 8-10), la variabilidad es mucho mayor ya que el techo se encuentra entre 46 y 119 cm de profundidad (promedio: 74 cm), con espesores entre 8 y 43 cm (promedio: 32 cm).

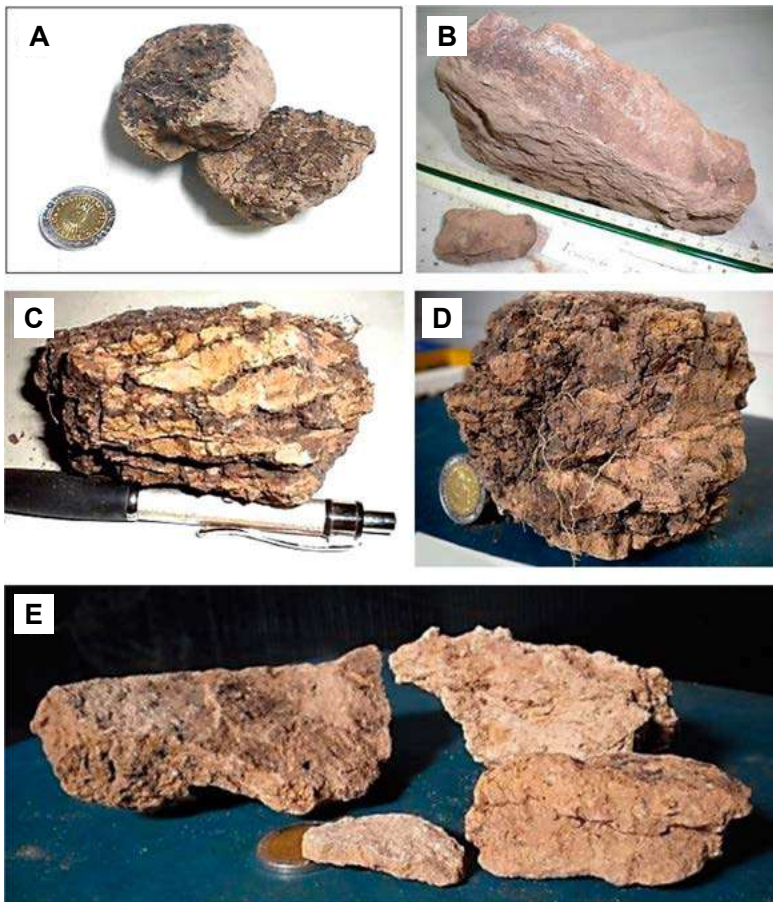
**Estructura.** El tipo de estructura merece una consideración especial; en primer lugar, el grado de especificidad en la descripción de los horizontes es variable en el país, según los distintos autores (Bonfils *et al.*, 1960; Miaczynski & Ferrer, 1973; Schiavo *et al.*, 1995; Imbellone & Giménez, 1998), ya que suele indicarse sólo la estructura primaria y raramente la secundaria o subestructura, en la cual el tamaño (clase) del agregado es menor **Tabla 1** \*5; de tal manera las descripciones se realizan con distinto grado de exactitud. Cabría preguntarse ¿qué importancia tiene describir la presencia de estruc-

tura primaria y secundaria en los suelos? La estructura secundaria es una subdivisión de los agregados primarios, y el agregado secundario es de menor tamaño que el primario. Los distintos niveles de la estructura (Brewer, 1964), desde macro- a microestructura, son responsables de procesos de conducción de fluidos en la zona no saturada y su identificación puede ser importante si hay una combinación de ambos. En la **Figura 8**  se muestran casos de agregados con depósitos superficiales de materiales solubles y sólidos en suspensión, como también distinta disposición de las raíces en las caras de agregados. Así, la macroestructura laminar/lenticular puede ser primaria o secundaria, por ejemplo, en P1 y P3 sería tipo laminar (primaria), fina (clase) y lenticular (secundaria), muy fina (clase). En ambos casos son estructuras con un eje mayor subhorizontal. Hay dos tipos de estructura cuyos agregados presentan un eje de mayor dimensión, horizontal o subhorizontal y difieren sólo en la forma de los agregados: laminar y lenticular. FitzPatrick (1980) define así a la estructura lenticular: “agregados en forma de lente, con superficies convexas, relativamente lisas, superpuestas entre sí y muy concordantes, a menudo con superficies superiores de textura más fina. Su génesis es congelamiento-descongelamiento o compactación por implementos”; la estructura laminar es definida como: “agregados dispuestos horizontalmente con superficies paralelas planas. Se origina por depositación sedimentaria o compactación antrópica”.

En la Región Pampeana la estructura laminar se menciona en las Cartas de Suelos de la Argentina (INTA, 1989, 1992) para caracterizar agregados orientados horizontalmente con un eje mayor horizontal o subhorizontal en enlames y horizontes A, E y en suelos afectados por compactación antrópica. Asimismo, se la describe en horizontes Bt, o BC de algunas series y perfiles representativos, sobre todo de la Pampa Arenosa (por ej.: Pueblitos, La Paulina, Santa Rita, perfil C-46 RP). También se encontró en horizontes genéticos Btxb y BCxb (Cantú *et al.*, 1995; Imbellone & Giménez, 1998; Imbellone *et al.*, 2005); el avance en los conocimientos permitió a los autores de este trabajo, reconocer la estructura lenticular, como una variante de la laminar. Los autores de este trabajo han observado y mencionado en la Pampa Arenosa y Pampa Deprimida estructuras que denominaron laminar, en la base de horizontes B y BC, semejantes a las estructuras lenticulares que se describen en esta presentación.

Las estructuras laminares y/o lenticulares difieren de la laminar que poseen las costras superficiales (enlames) en el espesor y en las características sedimentológicas. Las costras superficiales poseen láminas finas con un espesor de 1 a 2 mm y laminación fina granodecreciente. En cambio, las estructuras laminares descriptas aquí poseen clases diversas: finas, 1-2 mm **Figura 8B** , medias, 2-5 mm, gruesas, 5-10 mm **Figura 8E**  y muy gruesas, >10 mm **Figura. 8A-D**  se encuentran en horizontes iluviales profundos, tienen entre 20 y 40 cm de espesor y no se observa granulometría granodecreciente. Cuando la estructura es fina es muy difícil separar unidades discretas y todo el conjunto posee un aspecto “hojoso fino” con láminas/lentes de 0,1-0,2 mm de espesor, que se rompe en planos horizontales o subhorizontales **Figura 8B** .

Los límites superior e inferior de los agregados están bien marcados, con formas convexas, cóncavas e irregulares. La estructura lenticular puede ser gruesa o fina. En el primer caso el material puede estar total o parcialmente constituido por agregados lenticulares o subrectangulares discretos, con un eje mayor horizontal entre 5 y 0,5 cm y un eje menor vertical entre 1,5 y 0,2 mm **Figura 8C-D** . Los extremos de los agregados lenticulares pueden ser aguzados **Figura 8C**  o redondeados **Figura 8D** . Hay un sistema de vacíos planares y subplanares continuos o discontinuos y a veces vacíos con interconexiones verticales que definen una subestructura en bloques angulares **Figura 9** .



**Figura 8:** Morfología de muestras de mano con estructura laminar y lenticular.

**A:** Laminar gruesa primaria, y masiva secundaria, con barnices de arcilla y materia orgánica y raíces, sobre caras de agregados primarios. P1, 3BCkxb.

**B:** Laminar muy gruesa primaria y laminar fina secundaria. Obsérvese el canto de la muestra. P6, 2BCkxb. **C:** Lenticular gruesa (P10, 2BCkxb). **D:** Abundante cantidad de raíces que atraviesan agregados (P10, 2BCkxb). **E:** Laminar gruesa primaria, y masiva secundaria. Revestimientos de arcilla y humus en caras planares. P4, 2BCkxb.

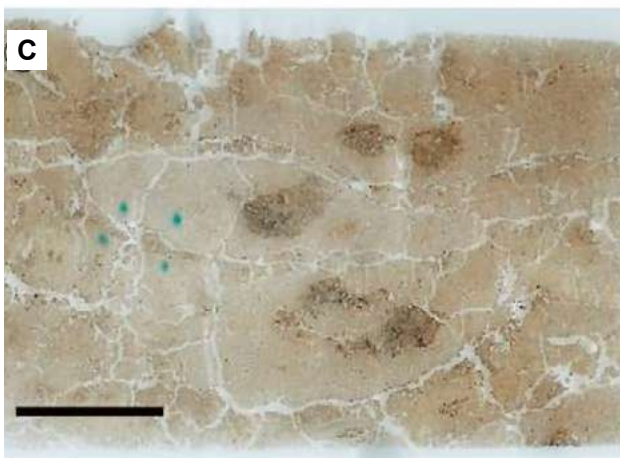
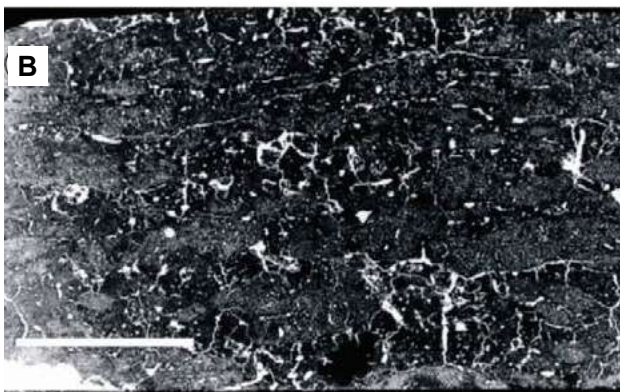
**Figure 8:** Morphology of hand specimens showing platy and lenticular structure.

**A:** Coarse platy primary structure and massive with clay and organic matter coatings and roots on faces of primary pedes (Pedon 1, 3BCkxb horizon). **B:** Very coarse platy primary structure and fine platy secondary structure; note edge of sample (Pedon 6, 2BCkxb). **C:** Coarse blocky primary structure and coarse lenticular secondary structure (Pedon 10, 2BCkxb horizon). **D:** Abundant roots passing through primary ped (Pedon 10, 2BCkxb horizon). **E:** Coarse platy primary structure and massive. Clay-humus coatings on planar faces (Pedon 4, 2BCkxb horizon).

En la literatura extranjera se asocia la génesis de la estructura “platiforme”, ya sea laminar como lenticular, con la presencia de propiedades frágicas, en aquellos que estuvieron sujetos a diferenciación criogénica de los materiales (FitzPatrick, 1956; van Vliet & Langohr, 1981; Payton, 1992). Sería un proceso físico de ruptura del material y reordenamiento granulométrico por deshielo con formación de revestimientos de limo. En los horizontes frágicos, estos procesos habrían ocurrido antes de que actuaran otros procesos pedogenéticos que generan ligazón entre partículas de la matriz; por lo tanto, cabría pensar que la estructura laminar/lenticular sería producida por el proceso pedogenético de criogénesis, recientemente considerado como tal. Este hecho se ha verificado en años recientes al incorporar a los Gelisoles como suelos formados en la superficie de zonas con régimen de temperatura críco. Siguiendo este razonamiento, tendríamos que aceptar que los procesos de criogénesis habrían actuado en la zona de estudio modificando la estructura original de los ciclos pedológicos antiguos en los momentos del máximo glacial, generando la estructura de fracturación mostrada. Dicha estructura no sería de origen sedimentario (Dr. Luis Spalletti, *com. pers.*).

La consistencia es poco variable en toda la zona de estudio; los horizontes Btxb y BCxb son: duros, muy duros, hasta extremadamente duros en seco y firmes y muy firmes y quebradizos en húmedo. Se diferencian de los descriptos en la provincia de Córdoba, donde son extremadamente firmes y muy firmes (Schiavo *et al.*, 1995). La quebradosidad (*brittleness*) es un comportamiento físico característico, pero no único de los fragipanes. Es una condición por la cual un fragmento de material soporta presión sin deformarse, hasta una presión crítica a la cual se quiebra. Esta propiedad está relacionada con la textura del material, el contenido de agua, agentes cementantes y la presión ejercida en el mismo. La





**Figura 9:** Fotografías de secciones delgadas donde se observa macroestructura laminar/lenticular. Barra de escala: 2 cm. **A:** Horizonte 3BCxb, P4 (119-156 cm). Las zonas más oscuras tienen distinto grado de carbonatación y las más claras corresponden a matriz sin carbonatar. En la zona superior derecha se observa laminación fina. Corresponde a la muestra de mano de la **Figura 8B** (tamaño 7,5 x 4 cm). **B:** Mismo horizonte que (a) donde se observa fisuración fina subparalela (tamaño 8,5 x 5 cm). **Figura C-D:** Horizonte 2BCknkb, Pedón 10 (52-96 cm). Las zonas más oscuras en **C:** son impregnaciones actuales de sesquióxidos. Se observa fuerte fisuración interpedal desordenada que da al material aspecto craquelado. Corresponden a muestras de mano de las **Figura C-D**.

**Figure 9:** Photographs of thin sections showing platy/lenticular macrostructure. Scale bar: 2 cm. **A:** 3BCxb horizon, P4 (119-156 cm). Dark areas have variable degrees of calcification and light areas correspond to a non-calcified matrix. Fine lamination shown in the upper right area. Sample corresponds to hand specimens shown in **Figure 8B**. (7,5 x 5 cm). **B:** Same horizon as (a) where fine subparallel fissuring is observed (8,5 x 5 cm). **Figure C-D:** 2BCknkb horizon, Pedon 10 (52-96 cm). Dark areas in **C:** are current sesquioxide impregnations. Strong disarranged interpedal fissuring is observed giving the material a craquelled aspect. Samples -corresponds to hand specimens shown in **Figure C-D**.






\* 1

mayoría de los horizontes frágicos se deslíen en agua siguiendo el criterio de Taxonomía de Suelos y WRB “los agregados naturales secos al aire, de entre 5-10 cm de diámetro en más del 50 % de la capa se deslíen cuando son sumergidos en agua”.

**Textura.** La textura del material originario se considera una propiedad clave en la formación de fragipanes. Existe acuerdo en que las clases texturales de los fragipanes no son demasiado finas, con  $\leq 30$  % de arcilla (Norfleet & Karathanasis, 1996; Mc Daniel *et al.*, 2008), aunque no hay límites texturales exactos. Las clases por tamaño de partículas citados en la literatura varían desde franca gruesa hasta limosa fina; los desarrollados en loess poseen clases limosas, mientras que los desarrollados en till poseen texturas arenosas francas. Generalmente no se encuentran en materiales con un contenido combinado de limo + arcilla  $< 35$  %. Incluso para una misma área de trabajo se describen grupos arenosos, como en nuestro caso,




con moda entre 50-100  $\mu\text{m}$ , AMF, y grupos limosos con moda entre 20-2  $\mu\text{m}$ , LF (Grossman & Cline, 1957). En ambos casos, la arcilla puede actuar como agente ligante formando puentes que dan rigidez al material en puntos de contacto entre partículas primarias, como también habían establecido Knox (1957) e Imbellone & Giménez (1998) para suelos con abundancia de arcilla illítica.

En los horizontes frágicos analizados predominan las clases franco arenosa y franco arcillosa y, en menor medida, las clases franca y franco arcillo arenosa. Respecto a las fracciones modales, como ya se mencionó, hay un conjunto de horizontes frágicos (en P1, P2, P3, P5) con moda principal entre 62-31  $\mu\text{m}$ , LG, y otro conjunto (en P6, P8, P9, P10) con moda en el intervalo 125-62  $\mu\text{m}$ , AMF **Tabla 2** , **Figura 4** . La mayoría posee contenidos de arcilla entre 20 y 29 % y algunos menores al 10 % **Tabla 1** , con arcilla predominante illítica **Tabla 4** , **Figura 7** .

Los horizontes C poseen entre 4 y 12 % de arcilla, en la mayoría de los suelos (P2, P4, P5, P6, P7, P8) y en otros entre 19 y 22 % (P9 y P10). Estos valores se encuadran en los mencionados en la literatura; por ejemplo, los fragipanes de EE.UU. (Bockheim & Hartemink, 2013) se han desarrollado en materiales con contenidos de arcilla menor al 25 %, con texturas francas; el menor encontrado es de 2 % aunque la mayoría se encuentra entre 13 y 25 %. Aunque nuestros suelos son poligenéticos con discontinuidades litológicas entre materiales loésicos, cabría alguna comparación y aún más con los valores de arcilla del suelo de la duna menores al 10 %.

## Óxidos pedogenéticos

Para comprobar la posible influencia de óxidos libres en el endurecimiento de los horizontes con propiedades frágicas, se analizaron Fe y Si extraíbles con ditionito-citrato-bicarbonato en horizontes seleccionados con dichas propiedades y otros suprayacentes que carecen de las mismas.

En los horizontes con propiedades frágicas de los suelos seleccionados los tenores de  $\text{Fe}_d$  varían entre 0,10 y 0,37 % y en la mayoría de los casos son iguales o menores en los horizontes B y BC suprayacentes sin propiedades frágicas **Tabla 5** . Se advierte asimismo que los contenidos de  $\text{Fe}_d$  en ambos tipos de horizontes son apreciablemente mayores en los suelos ubicados en las interdunas de la subregión de las dunas longitudinales, al O (promedio 0,38 %) con respecto a los de la subregión de dunas parabólicas, al E (0,10 %). Los tenores son menores a los hallados en otras partes del mundo donde en los horizontes Bx puede alcanzar a 1,50 % y en los suprayacentes no frágicos 1,76 % (Wilson *et al.*, 2010). Estos autores utilizan la relación  $\text{Fe}_d/\text{arcilla}$  para detectar vinculación entre ambos componentes; dicha asociación sólo existe parcialmente en los suelos estudiados.

Algunos autores (Tremocoldi *et al.*, 1994) consideran que relaciones  $\text{Si}_d/\text{Fe}_d$  elevadas son indicativas de desarrollo de fragipán. Esta afirmación no se cumple en nuestros suelos, en los cuales dichas relaciones son siempre menores en los horizontes con propiedades frágicas. Esta relación es variable en la bibliografía, ya que a veces los horizontes frágicos poseen contenidos de óxidos libres mayores (Steinhardt & Franzmeier, 1979), menores (de Kimpe *et al.*, 1972; Wang *et al.*, 1974; Wilson *et al.*, 2010) o semejantes (Park *et al.*, 2006) que los no frágicos. La comparación mencionada se encuentra en reiteradas ocasiones en la bibliografía, pues los autores tratan de explicar la influencia de los óxidos pedogenéticos libres en la cementación de los horizontes frágicos, hecho que no ha sido verificado en todos los casos. Según conjeturas informales manifestadas en trabajos pioneros, (Winters, 1942; Grossman & Carlisle, 1969) la sílice puede ser un agente cementante, considerando que pequeñas cantidades

poseen ese efecto entre las partículas. La experiencia realizada por los últimos autores utilizando varios extractantes, no muestra mayor concentración de sílice en los horizontes endurecidos. No obstante, Marsan & Torrent (1989) calculan que hay suficiente sílice para mantener las partículas unidas cuando la relación  $Si_d/Fe_d$  es cercana a 0,04. En nuestro caso, esa relación es mucho mayor pero no tenemos otra evidencia concurrente para considerar a la sílice como responsable de la cementación de los horizontes. Asimismo, relaciones Si/arcilla elevadas serían indicadoras de desarrollo de fragipanes; en nuestros suelos dicha relación sólo en dos casos es levemente superior en los horizontes Bx o BCx.

**Tabla 5:** Contenidos de arcilla, óxidos pedogenéticos totales de  $Fe_d$  y  $Si_d$  (Mehra & Jackson, 1960) y relaciones  $Si_d$ /arcilla y  $Si_d/Fe_d$  en horizontes seleccionados con propiedades frágicas (Btxb, BCxb) y suprayacentes (Btb, BCb).

**Table 5:** Contents of clay, total pedogenic  $Fe_d$  and  $Si_d$  oxides (Mehra & Jackson, 1960) and  $Si_d$ /clay and  $Si_d/Fe_d$  ratios in selected horizons with fragic properties (Btxb, BCxb) and overlying horizons (Btb, BCb).

Horizonte	Prof. (cm)	Arcilla (%)	$Fe_d$ (%)	$Si_d$ (%)	Relación $Si_d$ /arcilla	Relación $Si_d/Fe_d$
<b>Pedón 2</b>						
3Btmb	40 - 52	28,8	0,44	3,28	0,11	7,45
3BCnb	52 - 64	11,5	0,45	3,05	0,27	6,78
4Btkxb	64 - 96	21,1	0,37	2,05	0,10	5,54
4BCnxb	96 - 118	24,5	0,37	2,49	0,10	6,73
<b>Pedón 3</b>						
2Btb	50 - 68	22,7	0,45	3,31	0,15	7,36
3Btkxb1	68 - 85	8,7	0,27	1,88	0,03	6,96
3Btkxb2	85 - 115	10,2	0,32	2,09	0,20	6,53
<b>Pedón 4</b>						
2Btmb	60 - 85	31,7	0,10	1,99	0,06	19,9
2BCb	85 - 119	11,0	0,07	<0,05	-	-
2BCkxb	119 - 156	3,3	0,10	0,31	0,09	3,1
<b>Pedón 10</b>						
Btnsb	28 - 52	44,7	0,12	1,49	0,03	12,4
2BCnxb	52 - 95	28,9	0,12	0,97	0,03	8,08

Aún en suelos donde los horizontes frágicos poseen contenidos promedio de  $Fe_d$  de 0,8 % (intervalo: 0,54-1,10 %) y los horizontes eluviales e iluviales no endurecidos de 0,57 % (0,33-0,94 %), algunos autores desestiman la influencia de los óxidos pedogenéticos en las propiedades de los horizontes frágicos (Szymański *et al.*, 2011). En cambio, Weisenborn & Schaetzl (2005) consideran la posibilidad que el conjunto de óxidos pedogenéticos intervenga en las propiedades de dichos horizontes. También, Duncan & Franzmeier (1999) postulan que la alta resistencia a ruptura de estos horizontes se debe principalmente a enlaces con materiales ricos en  $Si_d$ . Encuentran alta correlación positiva con la resistencia a la ruptura cuando la relación molar  $Si_d / (Si_d + Al_d)$  es  $>0,5$  y señalan que los contenidos de  $Si_d$  son aproximadamente un décimo de los de  $Fe_d$ . Las soluciones se acumularían en horizontes subsuperficiales en invierno y primavera; en verano y principios de otoño las raíces de los árboles extraerían agua y concentrarían los compuestos con  $SiO_2$ ; ésta luego se adsorbería sobre superficies de aluminosilicatos o cristales de óxidos de Fe que cubren las arcillas. A través de sucesivas adiciones se podrían formar polímeros de  $SiO_2$  que formarían puentes con otros óxidos de Fe o minerales silicatados.




En nuestro caso no tenemos evidencia que el ciclo geoquímico de la sílice genere puentes de sílice que una las partículas de la matriz del suelo; en primer lugar, a diferencia de mucha información proveniente del hemisferio norte, nuestros suelos se desarrollan en pastizales en vez de bosques, y en segundo término, los suelos poseen reacción menos ácida que la necesaria para solubilizar la sílice, aunque hay gran cantidad de sílice amorfa disponible en el sistema por la presencia del vidrio volcánico. Sería un tema a investigar ya que Pellegrini *et al.* (2016) postulan una posible alteración antrópica de filosilicatos (illita) por acidificación de los suelos en la Región Pampeana, aunque allí no se han registrado pH menores a 4 en condiciones naturales.

## Micromorfología


Los granos esqueléticos predominan en la matriz de los horizontes frágicos. La fracción gruesa (arena más limo grueso) es de naturaleza loésica pampeana, con algunas variaciones en el tamaño de granos entre 125-31  $\mu\text{m}$ , 3-5  $\phi$ , poseen formas angulares y subangulares, algunos con mayor grado de redondeamiento en los distintos horizontes a lo largo de toda la transecta. Las trizas de vidrio volcánico son abundantes a muy abundantes y predominantes en la fracción liviana; siguen en abundancia plagioclasas, cuarzo y feldespatos potásicos. Se observan fragmentos líticos cuarzosos y volcánicos con pastas felsíticas cuarzo feldespáticas, acompañados por otros individuos de textura pilotáxica. Las plagioclasas presentan distinto grado de alteración. En la fracción pesada hay abundante hornblenda con menor cantidad de hipersteno, minerales opacos, augita, y minoritarios como granate y circón. En un Molisol de Carlos Tejedor, semejante a los presentados en este trabajo, Camilión & Imbellone (1984) determinan que hasta los 55 cm de profundidad el tenor de minerales pesados estaba entre 3,16 y 3,70 %, y por debajo de esa profundidad hasta los 194 cm el valor aumentaba hasta 5,80 %, indicando una discontinuidad litológica que separa distintos aportes sedimentarios.


La fracción fina es limo-arcillosa, siendo la mineralogía de arcilla mayoritariamente illítica, fuertemente ligada a los granos de arena y limo grueso. Se mostró en un trabajo anterior (Imbellone & Giménez, 1998), utilizando microscopía electrónica, la presencia de puentes de arcilla uniendo los granos del material grueso, responsables del carácter quebradizo del material, en los Pedones 1 y 4.



La matriz posee empaquetamiento denso en grado variable. La microestructura (estructura que no se aprecia a ojo desnudo) de los horizontes frágicos es principalmente en bloques subangulares y angulares; la microestructura lenticular es menos visible a este nivel de observación que a simple vista, observándose la laminar fina; en cambio, la macroestructura laminar gruesa y lenticular posee a nivel microscópico subagregados en forma de bloques, que sería una estructura terciaria o cuaternaria formada por microagregados en forma de bloques. Los microagregados poseen empaquetamiento denso entre los granos y vesículas mamelonares aisladas en la matriz y/o alineadas subhorizontalmente.

La macroporosidad es baja con abundancia de mesoporos, consistentes en fisuras y escasas vesículas (vughs), donde se desarrollan las raíces. La abundancia de los mismos otorga distinto grado de condición limitante a los horizontes con propiedades frágicas. A veces constituye un impedimento físico, como se observa en la **Figura 8B** \*1 y en otros casos favorece el tránsito radicular **Figura 8D** \*1. Hay poros alineados que se observan tanto en muestras de mano como en secciones delgadas **Figura 9B** \*1. Ocasionalmente, se observan numerosas fisuras irregulares subparalelas, cortas y largas, desordenadas y subparalelas, for-

mando una red de fisuras cortas que separan agregados y otras más largas, que dan un aspecto craquelado al material.

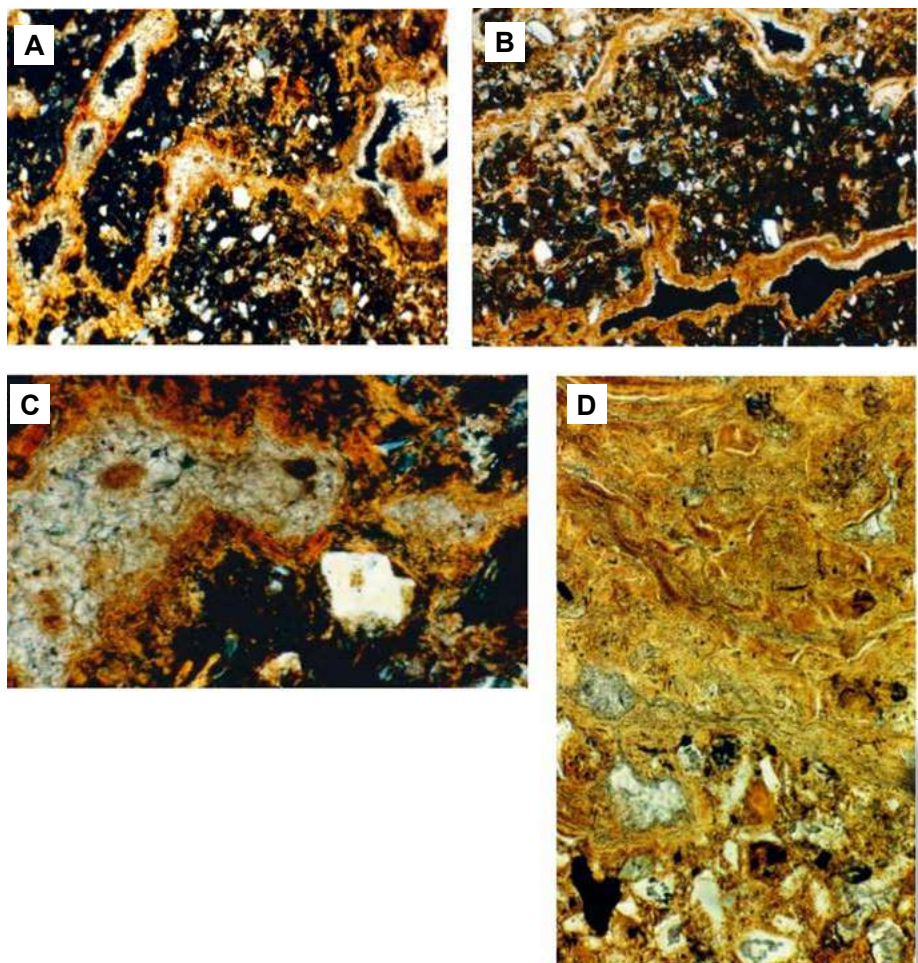
**Características y distribución de pedorrasgos.** Los principales rasgos pedológicos observados son los generados por procesos de argiluvación, carbonatación e hidromorfismo, con expresión relativa variable en los distintos suelos. Los procesos pedológicos no habrían sido coetáneos en la mayoría de los horizontes frágicos; la argiluvación habría sido previa, tanto a la carbonatación como al hidromorfismo, como lo muestra la posición relativa de los rasgos pedológicos en la **Figura 10** .

Los rasgos de argiluvación son revestimientos texturales, algunos finos y límpidos hasta otros espesos y continuos, ya sea en vacíos de conducción o, a veces, sobre granos y/o en la matriz. En el P10 se encuentran dos generaciones de revestimientos texturales: a) Abundantes revestimientos de arcilla laminares y orientados, transparentes, inmersos en la matriz, posiblemente formados antes que la estructura laminar/lenticular; y b) Nuevos revestimientos con menos arcilla y más limo relacionados a vacíos planares **Figura 10A-B-C**  donde los revestimientos cristalinos están sobre los texturales. En los Pedones 1 y 2 hay revestimientos laminados en vacíos tanto planares largos como redondeados, y escasos en la matriz. En el P4 se ven puentes de arcilla entre los granos de la matriz y abundantes masas arcillosas iluviales, además de los revestimientos, por lo que la matriz es heterogénea.

Los rasgos de carbonatación están asociados a: a) Los rasgos de argiluvación en los vacíos, a veces obliterando el espacio poral con calcita esparítica **Figura 11A-C-B** . La matriz, ya sea formando zonas subhorizontales de fuerte impregnación micrítica **Figura 11G-H**  y/o produciendo disrupción

**Figura 10:** Microscopía óptica de rasgos de argiluvación en horizontes con propiedades frágicas (Pedones 1 y 2). **A-B:** Revestimientos texturales arcillosos continuos, depositados en vacíos planares y cubiertos por revestimientos cristalinos de calcita esparítica X30. **C:** Detalle de (a) mostrando la obliteración de un vacío por crecimiento de esparita X50. **D:** Disrupción de revestimientos texturales por impregnación micrítica masiva (parte superior); matriz menos carbonatada, parte inferior X50..

**Figure 10:** Optical microscopy of lessivage features in horizons with fragic properties (Pedons 1 and 2). **A-B:** Continuous clayey textural coatings deposited on planar voids and covered with crystalline coatings of sparry calcite X30. **C:** Detail of (a) showing void obliterated by sparite growth X50. **D:** Disruption of textural coatings due to massive micritic impregnation (upper part); less calcified matrix is observed in the lower part X50.



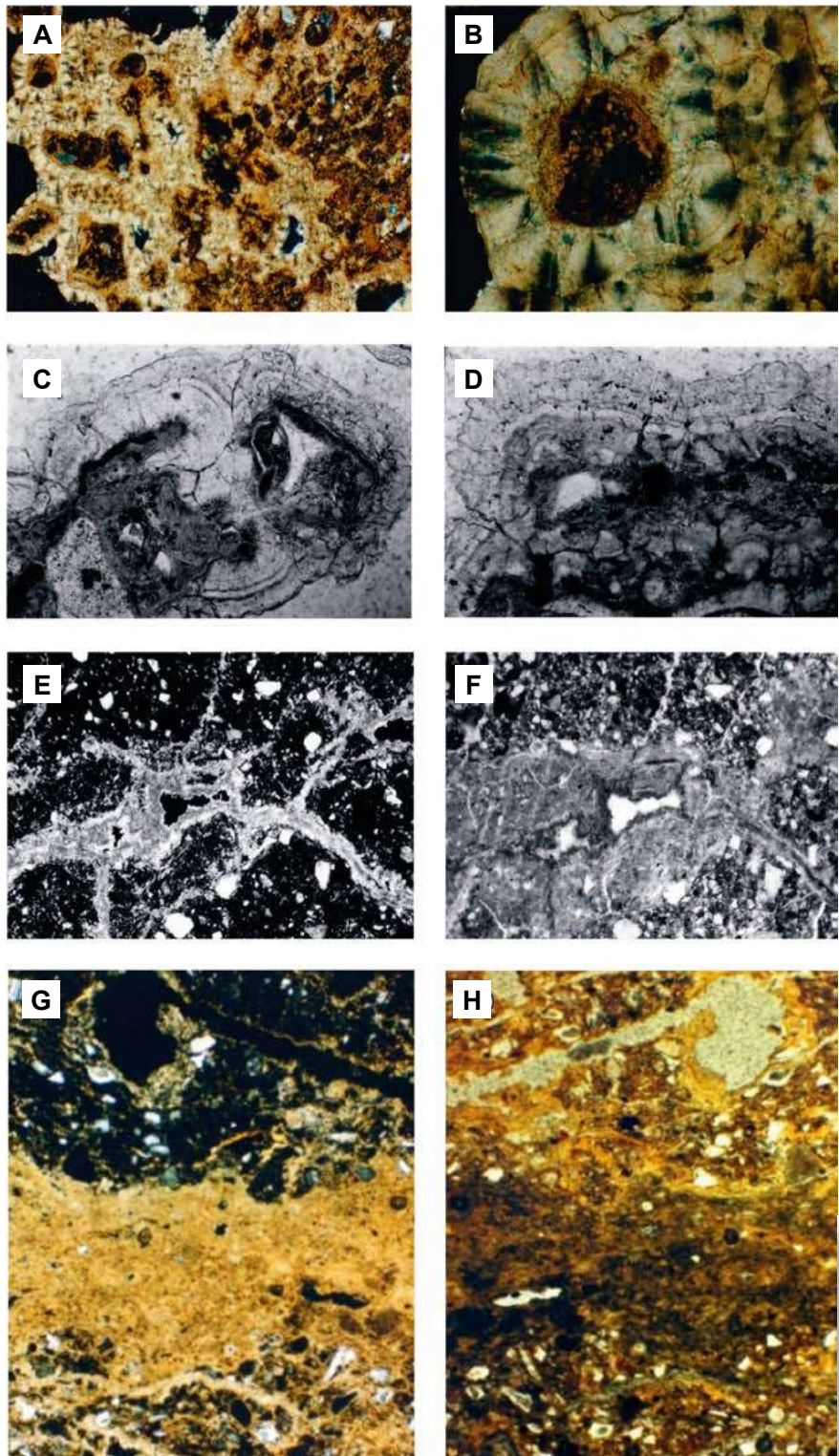


de los rasgos de iluviación anteriormente formados **Figura 11D** y/o nodulación de la matriz con esparita internodular **Figura 11A-D**. La carbonatación es variable, desde escasa a muy fuerte de tipo impregnativa en la matriz y/o escasa sobre revestimientos texturales y amorfos. En P3 hay fuerte carbonatación y escaso hidromorfismo.

Los rasgos de hidromorfismo son revestimientos amorfos finos en vacíos y/o impregnaciones de la matriz. El hidromorfismo actual es marcado en algunos suelos (Pedones 5, 8 y 9) y se manifiesta como zonas impregnativas en la matriz y como revestimientos amorfos finos sobre rasgos texturales. En P5 no se ve marcada laminación, pero hay fuerte hidromorfismo y carbonatación.

### Comparación entre horizontes Btxb y Btb


Haciendo un análisis comparativo de la granulometría entre los horizontes B y BC frágicos, con los horizontes B suprayacentes se observa que el contenido de arcilla total varía entre 20 y 40 % en los horizontes Bt y disminuye a valores entre 5 y 30 % en los horizontes Btxb y BCxb. Los horizontes Bt más modernos poseen tenores semejantes de arcilla total que



**Figura 11:** Microscopía óptica de rasgos de carbonatación en Pedones 2 y 3 **A-B-C-D:** Crecimiento de calcita esparítica produciendo nodulación de la matriz X30. **B:** Detalle de (A) X80. **C) D)** Festoneado sobre cara de agregado X80. **E-F:** Revestimientos cristalinos en vacíos X30. **G-H:** Bandas de impregnación micrítica fuerte X50.

**Figure 11:** Optical microscopy of calcification features in Pedons 2 and 3. X30. **A-B-C-D:** Growth of sparry calcite producing nodulation in the matrix. **B:** Detail of (A) X80. **C) D)** Festoons on ped face. **E-F:** Crystalline coatings on voids X30. **G-H:** Bands of strong micritic impregnation X50.

los horizontes Btb de paleosuelos y los horizontes Btxb endurecidos poseen menores tenores de arcilla total.

Con respecto al contenido de especies arcillosas, se observa en la **Tabla 4** \*<sup>3</sup> que en los Pedones 1 y 2 los dos horizontes con propiedades frágicas poseen menor contenido de illita que los horizontes Btnb de los ciclos pedológicos suprayacentes y sin propiedades frágicas. El horizonte con propiedades frágicas (2BCkxb) del P4 posee una relación semejante entre los minerales de arcilla respecto al horizonte sin propiedades frágicas suprayacente (2Btnb). Al contrario de lo que ocurre en los Pedones 1 y 2, en P10 el horizonte con propiedades frágicas (2BCkxb) posee mayor contenido de illita y menor de expandibles que el horizonte sin propiedades frágicas suprayacente (2Btssb).

Como era de esperar por la naturaleza estratificada de los suelos y la presencia de varios ciclos pedológicos superpuestos, no hay un patrón determinado en el contenido de especies arcillosas. Este hecho hace pensar que la mineralogía de las arcillas tiene escasa influencia en el desarrollo de las propiedades frágicas; los horizontes endurecidos no se diferencian marcadamente de los horizontes iluviales suprayacentes, sin propiedades frágicas, como también señalaron otros investigadores (Grossman & Carlisle, 1969; Lozet & Herbillon, 1971). Poseen las mismas especies minerales y tenores semejantes de las mismas, aun cuando existen discontinuidades litológicas.

## ■ GÉNESIS DE HORIZONTES CON PROPIEDADES FRÁGICAS

**Propiedades y procesos.** Hay una combinación de propiedades de los “fragipanes” que determinan la dureza en seco, el carácter quebradizo en húmedo y el desleimiento en agua. El carácter quebradizo es una característica que resulta de varias propiedades físicas y químicas que actúan en distintas combinaciones y grados (Bryant, 1989). Sin embargo, la combinación de factores y procesos formadores de suelos y la distribución en el paisaje no es totalmente conocida y su origen es muy discutido. Tal vez, una de las razones de esta incertidumbre es que no existiría un sólo tipo de fragipán con características únicas, como sugeriría el correspondiente horizonte de diagnóstico del sistema Taxonomía de Suelos (ver Giménez *et al.*, este libro), sino una diversidad de fragipanes o distintos estados de evolución del proceso (Bryant, 1989).

Si bien todos poseerían algunos rasgos comunes como consistencia dura en seco, quebradiza en húmedo y endurecimiento reversible, diferirían en otras propiedades morfológicas, físicas y químicas por haber evolucionado en diferentes materiales originarios y posiciones en el paisaje (Wilson *et al.*, 2010), tales como ambientes aluviales, coluviales, periglaciales, etc. Las capas y horizontes densificados y quebradizos pueden existir en materiales originales de distinto origen geológico tales como till, loess (Imbellone & Giménez, 1998; Schiavo *et al.*, 1995); loess y materiales aluviales (EEA INTA R. Peña, 1982-2007); materiales coluviales y aluviales (Irisarri & Ayala Torales, 1993; Apcarian *et al.*, 2014).

Por otro lado, el grado de expresión de los fragipanes puede variar por estar en diferentes estadios de su evolución: *fragipanes incipientes* (Grossman *et al.*, 1959), *protofragipanes* (Lindbo *et al.*, 1995; Ciolkosz & Waltman, 2000; Weisenborn & Schaetzl, 2005a,b), con propiedades frágicas incipientes y fragipanes propiamente dichos, como horizonte de diagnóstico de Taxonomía de Suelos y aún en evolución regresiva hacia otro tipo de panes, como aquellos calcretizados. Esta diversidad se resume en parte según Duchaufour (1977) en dos tipos de fragipanes: uno antiguo, un paleosuelo, en suelos de evolución

policíclica y compleja, heredado de procesos periglaciales y otro más reciente, pedogenético, resultante de la degradación de la estructura en materiales limosos.

Algunos fragipanes tienen mayor densidad aparente que los horizontes supra- e infrayacentes, pero otros no. En ese caso, cabría preguntarse: a) Cómo ocurre el proceso de densificación; b) Cuál es el tipo y proporciones de los agentes ligantes de la matriz que produce la quebradosidad y c) Qué procesos pedogenéticos actúan. En la formación de fragipanes serían necesarias algunas características iniciales del material originario que promueven el empaquetamiento denso, como texturas francas con abundancia de arena muy fina y limo, y bajo contenido de materia orgánica. En el mismo, actuarían: a) Procesos físicos de densificación que generan empaquetamiento denso, y b) Posteriores procesos pedológicos de ligazón entre granos de la matriz, por diversos agentes cementantes.

**Origen de la densificación y quebradosidad.** Muchos estudios atribuyen la quebradosidad de los fragipanes a agentes cementantes iluviados por pedogénesis, tales como aluminosilicatos, compuestos amorfos, oxihidróxidos, geles de hierro y aluminio, minerales de arcilla. Estos compuestos pueden ocurrir en los horizontes quebradizos como revestimientos, relleno de vacíos o puentes entre los granos de la matriz. La efectividad de cualquier agente cementante depende en parte de la estructura conductiva del material, que permite la depositación de distintos ligantes, generando numerosos contactos entre los granos, razón por la cual el empaquetamiento inicial del material debe ser abierto.

Se mencionan dos mecanismos como posibles responsables de la densificación: *criogénesis* (Fitz-Patrick, 1956; van Vliet & Langohr, 1981; van Vliet-Lanoë, 1985; Gerrard, 1992; Payton, 1992, 1993) y, modernamente, *hidroconsolidación* (Bryant, 1989, Assallay *et al.*, 1998, Smalley & Marković, 2014) o ambos, desconociendo en este caso el grado de influencia de cada uno de ellos.

**Hidroconsolidación.** En los horizontes densificados formados en depósitos de loess, principalmente primario, se considera la hipótesis del colapso de sedimentos saturados por agua y por su propio peso, también denominada *hidroconsolidación*. El término *sedimentos colapsables*, usado en la literatura ingenieril, se refiere a aquellos en los que se produce reordenamiento de fábrica, densificación y reducción de volumen bajo cierto peso y en estado de saturación con agua. Los depósitos eólicos son sedimentos altamente colapsables y hay numerosos estudios experimentales que así lo determinan (Roger *et al.*, 1994; Dijkstra *et al.*, 1995) y establecen que el colapso sería un proceso postdeposicional, influenciado por el contenido de arcilla y agentes que reducen su eficiencia ligante después del humedecimiento. Al ser depositado, el sedimento posee inicialmente estructura abierta que se va cerrando cuando los procesos de iluviación de arcilla la concentran en los puntos de contacto entre los granos. La colapsabilidad está impedida cuando el contenido de arcilla es cercano a 0 % o mayor de 30 %. Se necesita un contenido intermedio concentrado en los puntos de contacto entre los granos de limo/arena muy fina de la matriz, los que son mantenidos en contacto por la arcilla iluvial; a medida que la suspensión se concentra se forman meniscos que dejan puentes de arcilla y limo, que al humedecerse se debilitan y se rompen bruscamente (quebradosidad) cuando la fuerza aplicada es mayor que la soportada por los meniscos. El resultado es un cambio de una estructura abierta a un empaquetamiento denso del material. Hay algunas características comunes entre los sedimentos colapsables y el material de los horizontes con propiedades frágicas estudiados, tales como textura adecuada y presencia de puentes de arcilla; por lo tanto, no se descarta la participación de ese proceso.



La hidroconsolidación requiere tres condiciones: 1) Cantidades adecuadas de arcilla (5-30 %); 2) Profundidad para que la sobrecarga produzca suficiente esfuerzo por compresión (40-80 cm) y 3) Suficiente cantidad de agua que llegue a la profundidad antedicha. Las condiciones 1 y 2 se reúnen en los horizontes Bxb y BCxb estudiados; la tercera se infiere adecuada ya que los suelos se hallan actualmente en las áreas más deprimidas del paisaje y poseen rasgos redoximórficos, que serían en algunos casos heredados y otros actuales, hecho difícil de establecer.

**Criogénesis.** Ocurre en áreas afectadas en el pasado por condiciones periglaciares, debido a la compresión ejercida por la formación de las lentes de hielo durante la formación del permafrost, o la carga de las masas de hielo; opera por alternancia de congelamiento-descongelamiento en suelos que tienen o han tenido permafrost o congelamiento estacional. La estructura lenticular, semejante a la observada en algunos horizontes con propiedades frágicas de la Pampa Arenosa, es semejante a la generada por segregación de lentes de hielo en el suelo; por ello no se descarta la acción del congelamiento estacional superficial, que habría acaecido durante criómeros cuaternarios, cuando el techo de los horizontes Bxb y BCxb habrían estado en superficie. Estas estructuras son la única referencia de procesos criogénicos de la zona, aunque no sería impropio pensar en su influencia durante el último máximo glacial.

Otra característica que favorece la formación de horizontes con propiedades frágicas es la presencia de discontinuidades de meteorización litológicas o cronológicas, donde hay suelos soldados (Smeck *et al.*, 1989), propiedad que también se presenta en los suelos estudiados. Los horizontes frágicos reconocidos se encuentran en suelos policíclicos y en su génesis podría haber existido alguna participación de autocompactación y/o criogénesis (este trabajo), e hidromorfismo ácido en Córdoba (Schiavo *et al.*, 1995).

**Modelos de génesis de horizontes con propiedades frágicas en la Pampa Arenosa.** Presentamos a continuación la posibilidad de dos modelos con algunas semejanzas y con variaciones en el grado de intensidad de los procesos criogénicos. Se parte de la premisa que la región estuvo afectada por el frío durante el último máximo glacial y generó estructura laminar/lenticular en los suelos que en ese momento se hallaba en superficie.

**Congelamiento estacional.** En nuestro caso, la condición inicial del sedimento (textura franca, arcilla illítica) referida a la posibilidad del autocolapso sería adecuada, al igual que el humedecimiento (posición en el paisaje; régimen údico o ácuico), ya sea por cambio climático, evolución topográfica o combinación de factores. El colapso sería un proceso post-depositacional al que continuarían procesos pedogenéticos, como la argiluvación, responsable de la formación de los puentes arcillosos. La evolución geomórfica y pedológica posterior habría conducido a los materiales a adquirir las propiedades frágicas actuales, y aún a estados de evolución recesiva con formación de calcretas discontinuas. Un modelo sugerido de génesis de horizontes compactados en interdunas de la "Pampa Arenosa" se presenta a continuación:

En la génesis de los horizontes con propiedades frágicas estudiados habría:

- 1) Una condición inicial del material originario loésico potencialmente colapsable.
- 2) Redistribución del mismo hacia áreas interdunarias y generación de distinto tipo de estructura, ya sea lenticular, laminar o en bloques, generada por procesos superficiales sedimentarios y/o pedo-



lógicos, cuando los paleosuelos del ciclo más profundo estuvieron en superficie; estas estructuras se observan principalmente en el techo de los horizontes compactados.

- 3) Una acción pedológica posterior, que en algunos casos se manifiesta por revestimientos simples y compuestos de arcilla y arcilla y sesquióxidos y a veces de materia orgánica interlaminar. Todos ellos actuarían en distinto grado como agentes ligantes de los granos de la matriz; no podemos establecer claramente si estos pedorrasgos se habrían formado durante procesos pleistocenos con alguna intervención de pedogénesis más recientes, aunque éstas no muestran un grado tan avanzado como la que afectó al ciclo más antiguo, y en algunos suelos holocenos hay mínimo desarrollo de rasgos que indiquen reorganización pedológica.
- 4) Un proceso de carbonatación indicado por la posición relativa de los revestimientos calcíticos que se hallan encima de los revestimientos texturales.

Estos procesos se podrían esquematizar de la siguiente manera:

---

### **Formación del mar de arena (Iriondo, 1994)**

Procesos geomórficos, redistribución de materiales

Material originario en interdunas: estructura con contactos granulares abierta, suelta; texturas francas (30-70% de arena); material fino que se debilita al humedecerse →

### **Zona potencialmente colapsable**

Humectación, hidroconsolidación y/o congelamiento/descongelamiento estacional superficial → **Empaquetamiento denso**

Paleopedogénesis → **“Horizontes frágicos”**

Procesos geomórficos, erosión/ sedimentación, pedogénesis → **Suelos soldados**

Horizontes frágicos se hacen acuitardos. Flujo subsuperficial.

Regresión: carbonatación parcial → **Calcreta discontinua**

---

*Presencia de permafrost.* Esta es una idea innovadora para la zona, que relaciona la presencia de estructura lenticular/laminar y presencia de fragipán con el congelamiento profundo del suelo, sugerida por el Dr. E.A. FitzPatrick.

En los suelos interdunarios es conspicua dicha estructura debajo de una discontinuidad pedológica a profundidades variables (aproximadamente 60 cm), en el techo de un suelo enterrado a escasa profundidad. Estas estructuras son comunes en Europa y América del Norte en zonas periglaciares, donde han sido muy estudiadas por numerosos autores, que las atribuyen a permafrost (FitzPatrick, 1956, 1971, 1980; Payton, 1992, 1993; van Vliet-Lanoë, 1985; Kołodyńska-Gawrysiak *et al.*, 2017). En cambio, no hay referencias de su presencia en la zona estudiada, excepto por trabajos anteriores de los autores (Imbellone *et al.*, 2005).

La suposición de la posible presencia de permafrost discontinuo y/o esporádico o congelamiento estacional (Trombotto *et al.*, 2014) en la región, proviene de una extrapolación de isothermas climáticas, usando la presencia de moldes de cuñas de hielo como puntos de referencia. Estos moldes se han en-

contrado en Puerto Madryn, a 130 m s.n.m., 1000 km al sur del área de estudio (Vogt & Del Valle, 1994; Trombotto, 1996); en González Chávez, a 200 m s.n.m. y 300 km al sur (González & Corte, 1976) y en Mendoza, oeste de Argentina, a 825 m s.n.m., a una latitud cercana a la de Roque Pérez, 34° S (Grosso & Corte, 1989). Además, el límite exacto del permafrost, la geomorfología periglacial y las estructuras criogénicas no estarían aún bien definidas (Trombotto, 2002), pero el mapa de estructuras criogénicas asignadas a la gran glaciación cuaternaria supone una entrada de permafrost de algún tipo al sur de la provincia de Buenos Aires (D.Trombotto, *com. per.*).

Está ahora bien establecido que la media anual de temperatura requerida para la formación de cuñas de hielo es de  $-3,5$  a  $-6$  °C. Si la temperatura decrece 1 °C cada 150 km de N a S y se supone una disminución de 1 °C por cada 170 m de elevación, entonces la temperatura media en Roque Pérez podría haber sido  $0$  °C  $\pm 1$  °C, considerando el promedio de temperatura extrapolada de los tres sitios de referencia. Esa baja temperatura podría haber sido suficiente para la formación de un permafrost discontinuo o esporádico durante el Pleistoceno tardío, y así la estructura lenticular generada en ese momento se habría preservado hasta el presente.

Además, debe tenerse en cuenta que durante el Último Máximo Glacial (aprox. 24.000 años AP; Rabassa, 2008) se produjo un incremento de la superficie continental por exposición subárea de la plataforma debido al descenso del nivel del mar, el cual se ubicó a 120 - 140 m por debajo del nivel actual (Fleming *et al.*, 1998). En ese período la costa se encontraba a 490 km de la costa actual en la latitud de Bahía Blanca (Ponce *et al.*, 2011); además, según un mapa batimétrico de la plataforma continental (Violante *et al.*, 2014), la paleolínea de costa de 110 m se hallaba a 180 km de la costa actual en la latitud de Mar del Plata. Esta situación favoreció la “continentalización climática” al disminuir el efecto moderador marino, originando disminución de precipitaciones, aumento de las temperaturas extremas e intensificación de los vientos dominantes del oeste más fríos y secos (Violante *et al.*, 2014; Clapperton, 1993; Rabassa, 2008; Iriondo, 1999).

Debe señalarse también que en épocas históricas se registran en la región temperaturas mínimas absolutas medias anuales que varían entre  $-7,5$  °C al O (General Villegas) y  $-4,2$  °C al E (Nueve de Julio). Las temperaturas mínimas absolutas históricas para dichas localidades han sido de  $-11,0$  °C y  $-7,5$  °C, respectivamente (CIAg, 2013).

De tal manera, la región central de la pampa argentina habría tenido algún tipo de permafrost o, al menos, congelamiento estacional durante el Pleistoceno. Ello sugiere que la discontinuidad pedológica, señalada por el techo del fragipán, marcaría la parte superior del congelamiento profundo y la estructura lenticular sería la estructura parcialmente preservada del mismo, precisamente en las zonas más húmedas del paleopaisaje. El grado de preservación de esta estructura estaría determinado en gran parte por la hidrología del suelo; cuando el agua de fusión puede salir del sistema, la estructura quedaría preservada y cuando el suelo permanece saturado con agua la estructura colapsaría total o parcialmente (E.A. FitzPatrick, *com. pers.*)

## ■ CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS ESTUDIADOS

Según Taxonomía de Suelos los suelos de las áreas interdunarias son Molisoles y Alfisoles con horizontes mólicos y argílicos (nátricos) y en dos casos además horizontes álbicos; también es un Molisol

el suelo de la duna, pero sin horizonte argílico. Con respecto a las propiedades frágicas y en base a los resultados de la descripción de campo, principalmente, es posible hacer las siguientes consideraciones taxonómicas: según Taxonomía de Suelos ninguno de los suelos estudiados refleja en su nombre, a nivel de gran grupo o subgrupo, la presencia de propiedades frágicas. Ello se debe a que ningún horizonte cumple la totalidad de los requerimientos de un fragipán (Giménez *et al.*, este libro). Sin embargo, los suelos reúnen varias de las condiciones exigidas, como se indica a continuación. El requerimiento de espesor se satisface en todos los suelos, excepto el P6, que posee 8 cm de espesor. El espesor promedio de los horizontes frágicos es de 45,4 cm, variando entre 56 y 8 cm. Se debe destacar que el espesor promedio de los horizontes frágicos del área de interdunas longitudinales (Pedones 1, 2 y 3) es marcadamente mayor (52,3 cm) que en la zona de las dunas parabólicas (31,8 cm). La mayoría de los pedones posee evidencias de pedogénesis en forma de cutanes de iluviación de arcilla, sesquióxidos y depositación de calcita.

La estructura es una propiedad que sólo reúne el P1, en que el horizonte frágico tiene estructura prismática media que rompe en bloques angulares. En el resto de los pedones, la estructura es laminar o una variante de ella, la lenticular. En este sentido, debe señalarse que, en las primeras versiones del sistema (por ejemplo, 7a. Aproximación), se indica que *“muchos fragipanes tienen estructura laminar gruesa, de moderada a fuerte, dentro de los prismas gruesos”*. No es el caso del Pedón 1 en que los prismas no tienen subestructura laminar. Por otro lado, la escuela europea (van Vliet & Langohr, 1981; FitzPatrick, 1956) menciona como principal estructura a la laminar/lenticular.

Asimismo, la exigencia de estructura mencionada se vincula a la penetración dificultosa de las raíces, debiendo estar los agregados separados por 10 cm o más. Se trata en este caso de estructura prismática, columnar o en bloques y dicha distancia se refiere al ancho de los agregados. En el caso de la estructura laminar, la clase por tamaño no es comparable ya que se refiere al espesor de los agregados, variando entre <1 mm la clase muy fina y >10 mm la muy gruesa.

Por otro lado, la estructura laminar/lenticular tiene un espesor variable, más gruesa en el centro de agregado y afinándose hacia los extremos. En los suelos estudiados que poseen esa estructura, se ha tomado como valor el mayor espesor que generalmente oscila entre 5 y 10 mm (clases media a gruesa). El ancho de las lentes varía generalmente entre 50 y 80 mm, aunque no debe considerarse que las raíces están separadas por estas distancias, ya que a menudo los agregados están atravesados por grietas finas que permiten el paso de raíces, a veces muy abundantes, como se observa en P10.

El desleimiento en agua se produce total o parcialmente en todos los suelos, salvo en el P3, probablemente debido al contenido alto de carbonato de calcio. La consistencia en húmedo es firme en la mayoría de los pedones, sólo en los Pedones 6, 8 y 9 es friable; en todos los casos los horizontes son quebradizos.

En todos los casos se produce efervescencia leve, moderada o fuerte al aplicar HCl y en algunos suelos hay marcada movilización de carbonato de calcio y depositación de calcita en forma de revestimientos. Esta última propiedad excluye a los horizontes de considerarlos fragipanes, pero no de “propiedades frágicas” ya que no menciona esta prohibición. De tal manera, casi todos los suelos poseerían propiedades frágicas pues en ellas no hay exigencias de estructura. Sin embargo, tales propiedades no se pueden indicar en la taxonomía porque en ninguno de los grandes grupos reconocidos se prevén subgrupos “frágicos”.

Según el sistema WRB, se han identificado los siguientes taxones en el primer nivel (Grupo de Suelos de Referencia): Solonetz (4 pedones), Phaeozem (3), Stagnosol (2) y Planosol (1). Esta clasificación tampoco ha permitido reflejar las características mencionadas ya que el calificador “frágico” se aplica a suelos que tienen “horizonte frágico”, el cual exige la presencia de la estructura mencionada y la ausencia de reacción al HCl (Giménez *et al.*, este libro). Según lo expuesto, se deduce que la cartografía regional nacional no reflejaría la extensión areal de suelos con propiedades frágicas en sentido amplio.

## ■ CONSIDERACIONES FINALES

Estas consideraciones se refieren a dos temas centrales: a) Caracterización, génesis y clasificación de los suelos de la parte central y oeste de la Pampa Arenosa, y b) Caracterización y génesis de horizontes frágicos del área. Se presentan los suelos de las áreas interdunarias de la región central de la Pampa Arenosa de la provincia de Buenos Aires, en los partidos de Carlos Tejedor, Carlos Casares, Saladillo y Roque Pérez. El área posee geoformas eólicas con dunas de arena longitudinales y parabólicas, estabilizadas por vegetación graminosa. Entre estas formas relictos de climas más secos, se hallan áreas deprimidas y mantos de arena planos, donde se desarrollan suelos evolucionados policíclicos que suelen estar anegados durante los excesos hídricos en que el nivel freático alcanza la base de los suelos y/o poseen capas colgadas periódicamente.

Las propiedades en común que poseen todos los suelos son: el loess arenoso como material originario y abundancia de arena muy fina, y en las interdunas se suma la presencia de paleosuelos y de horizontes con propiedades frágicas. Los suelos de las áreas interdunarias, mantiformes y deprimidas son más complejos pedológicamente y de textura más fina que los de las dunas. Constituyen sucesiones loess-paleosuelos resultantes de una alternancia de períodos de estabilidad con desarrollo de pedogénesis durante un clima más benigno y de erosión-depositación en períodos más secos. Son suelos enterrados superpuestos, poligenéticos, con varios ciclos pedológicos, algunos complejos donde no siempre se puede identificar el horizonte C para tomarlo como material menos pedogenizado correspondiente al depósito original. Diferentes ciclos pedológicos se pueden establecer en el campo mediante observación de la macromorfología: secuencia de horizontes, tipos de límites, características de la estructura y consistencia. Existe gran diversidad pedológica como lo muestran los rasgos pedológicos de los procesos actuantes, las secuencias de horizontes y el nombre de los suelos. Los procesos pedológicos actuales y pasados son de la misma naturaleza, aunque con diferente grado de expresión, y observables en el campo: melanización, argiluvación, hidromorfismo, carbonatación y sodificación. En los ciclos modernos el hidromorfismo está asociado al régimen ácuico juntamente con la sodificación; el hidromorfismo es generalizado, pero discontinuo temporalmente con respecto al nivel freático, pues no hay ningún horizonte gleizado que evidencie saturación durante largos períodos de tiempo. Más marcado es el hidromorfismo de capa colgada (episaturación) mostrado por las lenguas eluviales de los horizontes E, posiblemente vinculado a características del microrrelieve. La melanización sólo se observa en el ciclo pedológico más moderno. La argiluvación y carbonatación son conspicuas en los ciclos pedológicos más antiguos. El techo de los horizontes frágicos, que puede considerarse como guía para el área del ciclo pedológico más antiguo, se encuentra a una profundidad promedio de 70 cm. Los horizontes frágicos poseen distinto grado de expresión, ocurrencia discontinua en el terreno, y están afectados por procesos de argiluvación, hidromorfismo y carbonatación. El análisis micromorfológico muestra que estos procesos no han sido coetáneos.



Los suelos interdunarios están en áreas relativamente más bajas que el paisaje medanoso general. Se encontraron algunas diferencias entre los suelos del este y oeste del área estudiada: al oeste (P1, P2 y P3), el régimen de humedad actual es údico, hay menor grado de hidromorfismo, menor salinidad, menor pH, horizontes A masivos, menor contenido de sodio de intercambio, textura más fina con modas LG y AMF, menor variación en profundidad y espesor de los horizontes frágicos; contrariamente, al este (P4-P6; P8-P10) el régimen es ácuico y la moda está en AMF, AF y LG.

Los horizontes frágicos (Btxb y BCxb) son quebradizos y se deslíen en agua aquellos que poseen moderado contenido de carbonato de calcio. Como rasgo peculiar poseen estructura lenticular y/o laminar, y espesor variable principalmente entre 20 a 40 cm. Esta estructura pedológica se asocia a la acción de procesos criogénicos, ya que no hay ningún otro proceso pedogénico que genere esa estructura. La presencia de horizontes con propiedades frágicas podría afectar a la circulación de fluidos y no siempre a las raíces ya que a veces atraviesan la estructura secundaria.

Los pedones presentan heterogeneidad granulométrica en su sección vertical debido tanto a procesos sedimentológicos como pedológicos. En el suelo de la duna, que es el único formado por procesos puramente eólicos, la heterogeneidad es sedimentaria. El material originario de todos los suelos es loess arenoso con fuerte participación de AMF (subfracción de arena más abundante). En la zona oriental la granulometría general es más gruesa que en el resto de los suelos estudiados y la tendencia muestra que la distribución de tamaño de partículas se desplaza hacia un mayor contenido de las subfracciones AMF y AF. Los valores de Mz permiten estimar el grado de iluviación, aunque los perfiles no son homogéneos; es variable en cada uno de los perfiles y se encuentra entre 6 y 7 Ø (entre 16 y 8 µm, LF), como era de esperar, en correspondencia con horizontes iluviales B y BC. Algunos horizontes C son arenosos y los valores de Mz se acercan a los hallados en la duna. Localmente, la distribución de tamaño de partículas está fuertemente influenciada por la de los materiales de origen y la incorporación de material grueso habría ocurrido por removilización del material de las dunas preexistentes. La heterogeneidad se debería a: a) Heterogeneidad del depósito original, ya que registran varios aportes indicados por las discontinuidades granulométricas y cambios de tendencia de las funciones profundidad de las fracciones arena y limo y, b) Reorganización del material fino por pedogénesis antigua y/o actual; esta última en ocasiones es muy acentuada llegando a estados de degradación del suelo con la formación de horizontes E y lenguas verticales de pérdida de coloides.

Todos los suelos son predominantemente illíticos, con variaciones porcentuales ligeras entre los horizontes comparados. Algunas variaciones relativas entre horizontes se deberían a discontinuidades litológicas y/o diferenciación pedológica. Particularmente, los horizontes Btx suelen poseer individualmente mayor contenido de illita que expandibles + interestratificados. Desconocemos en qué medida las condiciones ambientales afectaron la transformación mineral ya que durante el Holoceno y Pleistoceno tardío no habrían sido favorables para generar fuerte transformación y/o neogénesis en los suelos.

Con respecto a la presencia de óxidos pedogenéticos, los horizontes frágicos poseen contenidos de Fe<sub>d</sub> y Si<sub>d</sub> iguales o menores que los no frágicos. Por tanto, considerando la mineralogía de arcillas y las relaciones entre óxidos pedogenéticos, estos parámetros no aportarían información acerca de su influencia en el proceso de endurecimiento de los horizontes con propiedades frágicas. Los agentes ligantes entre partículas de la matriz serían productos de iluviación de filosilicatos, que es un proceso común

en la Región Pampeana, a diferencia de otros suelos formados por procesos de iluviación de complejos orgánicos/sesquioxídicos, ausentes en la región.

Se presentan dos modelos de formación de los horizontes frágicos con estructura laminar y/o lenticular, ambos basados en la hipótesis que hubo alguna acción criogénica, de distinta intensidad, en las áreas interdunarias, más húmedas, durante el criómero cuaternario. La diferencia se basa en la intensidad de estos procesos; el primero parece más aceptable a partir de la observación de congelamiento superficial en la actualidad; el segundo estaría avalado por una estimación de la presencia de permafrost en dichas áreas. Esta se basa en la presencia de estructura lenticular hallada claramente en algunos suelos. Ambas teorías necesitan ser confirmadas mediante estudios de campo y laboratorio.

Tomando los criterios estrictos de Taxonomía de Suelos, ninguno de los suelos analizados reúne las exigencias necesarias para denominarse fragipán por no poseer los requerimientos de tipo y/o clase de estructura. Por lo tanto, hablamos de “fragipanes” en sentido amplio, sin connotaciones taxonómicas, o nos referimos a ellos con la denominación de suelos con *propiedades frágicas*.

## ■ AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Ewart Adsil FitzPatrick por sus esclarecedores conceptos sobre el tema tanto en el campo, en identificación de estructuras laminares/lenticulares como en el laboratorio, en la generación de las mismas. Al Dr. Luis Spalletti por sus enriquecedores conceptos sedimentológicos. A la Lic. Cecilia Genazzini por la confección de registros difractométricos en el Centro de Investigaciones Geológicas. A los Lic. Carlos Sánchez y Daniel Muntz por la diagramación de las figuras.

## ■ BIBLIOGRAFÍA

- Apcarian, A; PM Schmid & MC Aruani. 2014. Suelos con acumulaciones calcáreas en el Alto Valle de Río Negro, Patagonia norte. En: PA Imbellone (ed.). Suelos con acumulaciones calcáreas y yesíferas de Argentina. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Ediciones INTA. Buenos Aires. 149-181.
- Aragón, R; EG Jobbágy & EF Viglizzo. 2010. Surface and groundwater dynamics in the sedimentary plains of the Western Pampas (Argentina). *Ecohydrology* 43 (3): 433-447.
- Assallay, AM; I Jefferson; CDF Rogers & IJ Smalley. 1998. Fragipan formation in loess soils: development of the Bryant hydroconsolidation hypothesis. *Geoderma* 83: 1-16.
- Biscaye, PE. 1965. Mineralogy and sea sedimentation of recent deep-sea clays in the Atlantic ocean and adjacent seas and oceans. *Geol. Soc. Am. Bull.* 76: 803-832.
- Bockheim, JG & AE Hartemink. 2013. Soils with fragipans in the USA. *Catena* 104:233-242.
- Bonfils, CG; JE Calcagno; PH Etchevehere; J Ipucha Aguerre; CRO Miaczynski & LA Tallarico. 1960. Suelos y erosión en la región pampeana semiárida. *R.I.A.* 13 (4): 319-407.
- Brewer, R. 1964. Fabric and mineral analysis of soils. John Wiley & Sons, New York. 470 p.
- Bryant, RB. 1989. Physical processes of fragipan formation. En: NE Smeck & EJ Ciolkosz, (eds.). Fragipans: Their occurrence, classification, and genesis. *Soil Sci. Soc. Am. Spec. Publ.* Vol. 24: 141-150.
- Cabrera, AL. 1968. Flora de la provincia de Buenos Aires. Colección Científica. INTA. Buenos Aires.
- Camilión, MC & PA Imbellone. 1984. Caracterización de los materiales constituyentes de algunos suelos del partido de Carlos Tejedor, provincia de Buenos Aires. *Ciencia del Suelo* 2: 137-148.

- Cantú, MP; HF Schiavo & AR Becker. 1997. Fragipans micromorphology of soil in Curapaligüe depression, Córdoba, Argentina. En: Shoba, S; M Gerasimova & R Miedema (eds.): *Soil Micromorphology: Studies on Soil Diversity, Diagnostics, Dynamics*. 67-71. Moscow–Wageningen.
- Cappannini, DA & O Domínguez. 1956. Grandes unidades geoedafológicas de la provincia de Buenos Aires. Instituto de Suelos y Agroecología. Informe inédito.
- Cappannini, DA & O Domínguez. 1961. Los principales ambientes geoedafológicos de la provincia de Buenos Aires. Instituto de Suelos y Agroecología. INTA. *IDIA*. N° 163: 33-39.
- Carver, RE (ed.) 1971. *Procedures in sedimentary petrology*. Wiley Interscience. John Wiley and Sons. New York. 653 pp.
- CIAG. 2013. Heladas en la Argentina. Centro de Información Agroclimática. Facultad de Agronomía, UBA. Edición digital: [www.agro.uba.ar/heladas/](http://www.agro.uba.ar/heladas/) Último acceso; 30 junio 2017,
- Ciolkosz, EJ & WJ Waltman. 2000. Pennsylvania's fragipans. *Pennsylvania State University Agronomy Series* 147. 37 pp.
- Clapperton, C. 1993. *Quaternary geology and geomorphology of South America*. Elsevier, Amsterdam. 779 pp.
- de Kimpe, CR; RW Baril & R Rivard. 1972. Characterization of a toposequence with fragipan: the Leeds-St. Marie-Brompton series of soils, province of Quebec. *Can. J. Soil Sci.* 52 (2): 135-150.
- Deschamps, JR; O Otero & EP Tonni. 2003. Cambio climático en la pampa bonaerense: las precipitaciones desde los siglos XVIII al XIX. Documento de Trabajo No. 109. Universidad de Belgrano, Buenos Aires. Disponible en Internet: [http://www.ub.edu.ar/investigaciones/dt\\_nuevos/109\\_deschamps.pdf](http://www.ub.edu.ar/investigaciones/dt_nuevos/109_deschamps.pdf) (Último acceso 30 junio 2017)
- Dijkstra, TA; IJ Smalley & CDF Rogers. 1995. Particle packing in loess deposits and the problem of structure collapse and hydroconsolidation. *Eng. Geol.* 40: 49-64.
- Dillon, AA; MA Hurtado; JE Giménez & RJ Castillo. 1989. Consideraciones geomorfológicas y estratigráficas como base del carteo de suelos de un sector de la Pampa Arenosa (Provincia de Buenos Aires). *Actas Primeras Jornadas Geológicas Bonaerenses*. Tandil. 737-749.
- Duchaufour, P. 1977. *Pédologie. 1. Pédogenèse et classification*. Masson. Paris. 477 pp.
- Duncan, MM & DP Franzmeier. 1999. Role of free silicon, aluminum, and iron in fragipan formation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 923-929.
- EEA INTA Sáenz Peña. 1982-2007. Carta de Suelos de la República Argentina. Provincia del Chaco. Estudios de suelos en escala 1:50.000 por departamento. Convenio Estación Experimental Agropecuaria INTA Sáenz Peña-Gobierno de la Provincia del Chaco. Ediciones digitales: [inta.gob.ar/documentos/mapas-de-suelo-de-la-provincia-del-chaco](http://inta.gob.ar/documentos/mapas-de-suelo-de-la-provincia-del-chaco) (Último acceso: 10/1/2017).
- FitzPatrick, EA. 1956. An indurated soil horizon formed by permafrost. *J. Soil Sci.* 7:248-257.
- FitzPatrick, EA. 1971. *Pedology, a systematic approach to Soil Science*. Oliver and Boyd, Edinburgh. 306 pp.
- FitzPatrick, EA. 1980. *Soils, their formation, classification and distribution*. Longman. London. 353 pp.
- Fleming, K; P Johnston; D Zwartz; Y Yokoyama; K Lambeck & J Chappell. 1998. Refining the eustatic sea-level curve since the Last Glacial Maximum using far- and intermediate-field sites. *Earth Planet. Sc. Lett.* 163: 327-342.
- Folk, RL. 1954. The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary rock nomenclature. *J. Geol.* 62 (4): 344-359.
- Folk, RL & WC Ward. 1957. Brazos River bar, a study in the significance of grain-size parameters. *J. Sediment. Petrol.* 27: 3-27.
- Forte Lay, JM; RM Quintela & OE Scarpati. 1989. Evolución de las características hidrometeorológicas de la llanura pampeana argentina. Seminario Internacional sobre Hidrología de Grandes Llanuras. Buenos Aires. Contribución HLL-II/41/TRA.
- Frenguelli, J. 1950. Rasgos generales de la morfología y la geología de la provincia de Buenos Aires. Publicaciones del Laboratorio de Ensayos de Materiales y Tecnología (LEMIT). Serie II, No. 33. La Plata.
- Gardenal, M. 1986. Geomorfología del Partido de Salliqueló, provincia de Buenos Aires. Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, informe inédito, 60 pp.
- Gerrard, J. 1992. *Soil Geomorphology*. Chapman & Hall. London. 269 pp.

- Giménez, JE; PA Imbellone & RR Iasi. 1996. Suelos con fragipán del noroeste de la provincia de Buenos Aires. *Revista del Museo de La Plata (NS)* XI (109): 119-134.
- González, MA & AE Corte. 1976. Pleistocene geocryogenic structures at 38° S L., 60° W and 200 m above sea level, González Chávez, Buenos Aires province, Argentina. *Biuletyn Peryglacjalny* 25: 23-33.
- Grossman, RB & MG Cline. 1957. Fragipan horizons in New York soils. II. Relationships between rigidity and particle-size distribution. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 21: 322-325.
- Grossman, RB & FJ Carlisle. 1969. Fragipan soils of the eastern United States. *Adv. Agron.* 21: 237-279.
- Grossman, RB; JB Fehrenbacher & AH Beavers. 1959. Fragipan soils of Illinois. I. General characterization and field relationships of Hosmer silt loam. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 23: 65-70.
- Grosso, SA & AE Corte. 1989. Pleistocene ice wedge casts at 34° S. Eastern Andes piedmont, south-west of South America. *Geogr. Ann.* 71A (3-4): 125-136.
- Grupo Consultor. 1987. Lineamientos generales y regionales para un plan maestro de ordenamiento hídrico del territorio bonaerense. Convenio MOSP Nación-Provincia de Buenos Aires. La Plata. 310 pp.
- Hu Biru & Lu Yanchou. 1985. Composition of loess. En: Liu Tungsheng *et al.* (eds.) Loess and the environment. Institute of Geology. Academia Sinica. Section I. Chapter 5, 93-98. 256 pp. China Ocean Press. Beijing.
- Imbellone, PA. 2011. Classification of paleosols. *Geociências*. Revista do Insitituto de Geociências e Ciências Exatas. Univ. Estadual Paulista. Brasil. 30: 5-13.
- Imbellone, PA & MC Camilión. 1988. Characterization of the buried tephra layer in soils in Argentina. *Pédologie* 38: 155-171.
- Imbellone, PA & ME Teruggi. 1993. Paleosols in loess deposits of the Argentine Pampas. *Quatern. Int.* 17: 49-55.
- Imbellone, PA & JE Giménez. 1998. Parent materials, buried soils and fragipans in northwestern Buenos Aires province, Argentina. *Quatern. Int.* Vol 51/52: 115-126.
- Imbellone, PA & ML Mormeneo. 2011. Vertisoles hidromórficos de la planicie costera del río de la Plata, Argentina. *Ciencia del Suelo* 29: 107-127.
- Imbellone, PA; JE Giménez & ML Mormeneo. 2004. Ciclos pedogenéticos del oeste bonaerense. Congreso Argentino de la Ciencia del Suelos. Actas. (En: C.D.Rom).
- Imbellone, PA; JE Giménez & A Cumba. 2005. Suelos con «fragipán» de la Pampa Arenosa. Actas XVI Congreso Geológico Argentino, La Plata. Vol. 5: 65-72.
- Imbellone, PA; JE Giménez & JL Panigatti. 2010. Suelos de Región Pampeana. Procesos de formación. Ediciones INTA. Buenos Aires. 320 pp.
- Imbellone PA; JE Giménez; ML Mormeneo & MG Cuberes. 2012. Suelos loésicos influenciados por depósitos de conchilla pleistocenos de la Formación Pascua, Noreste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Lat. Am. J. Sedimentol. Basin Anal.* 19 (2): 67-88.
- INDEC. 2002. Censo Nacional Agropecuario. Instituto Nacional de Estadística y Censos. Buenos Aires.
- INTA. 1989. Mapa de suelos de la provincia de Buenos Aires. Escala 1:500.000. CIRN. Buenos Aires. 525 pp y mapas.
- INTA. 1992. Carta de Suelos de la República Argentina. Hojas 3560-28 Saladillo y 3560-29 Roque Pérez. Centro de Investigaciones de Recursos Naturales. Instituto de Suelos. Castelar. Actualizaciones en Internet: <http://www.inta.gov.ar/suelos/cartas> (Último acceso:30 junio 2017).
- Iriondo, M. 1990a. The map of the South American plains. Its present state. En: J Rabassa (ed.). *Quaternary South Am.*. A.A. Balkema, Rotterdam. 6: 297-308.
- Iriondo, M. 1990b. A late Holocene dry period in the Argentine plains. En: J Rabassa (ed.). *Quaternary South Am.* A.A.Balkema, Rotterdam. 7:197-218.
- Iriondo, M. 1994. Los climas cuaternarios de la región pampeana. *Comunicaciones del Museo Provincial de Ciencias Naturales "Florentino Ameghino"*. Nueva Serie 4(2): 1-48. Santa Fe.
- Iriondo, M. 1999. Last Glacial Maximum and Hypsithermal in the Southern Hemisphere. *Quatern. Int.* 62: 11-19.
- Iriondo, M & DM Kröhling. 1995. El Sistema Eólica Pampeano. *Comunicaciones Museo Provincial de Ciencias Naturales "Florentino Ameghino"*. Nueva Serie. 5 (1). Santa Fe.



- Irisarri JA & E Ayala Torales. 1993. Estudio de suelos para selección de sitios forestales. Valles de Colonia Josefa, Negro Muerto y Guardia Mitre. Provincia de Río Negro. C.F.I., 88 pp y anexos.
- IUSS Working Group WRB. 2015. Base referencial mundial del recurso suelo 2014. Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 106. FAO, Roma. 205 pp.
- Knox, EG. 1957. Fragipans horizons in New York soils. III. The basis of rigidity. *Soil Sci. Soc. Am. P.* 21: 326-330.
- Kołodzyńska-Gawrysiak, R; J Chodorowski; P Mroczek; A Plak; W Zglobicki; A Kiebała; J Trzciński & K Standzikowski. 2017. The impact of natural and anthropogenic processes on the evolution of closed depressions in loess area. A multi-proxy study from Nałęczów Plateau, Eastern Poland. *Catena* (en prensa).
- Kröhlhing, D & O Orfeo. 2002. Sedimentología de unidades loésicas (Pleistoceno tardío-Holoceno) del centro-sur de Santa Fe. *Rev. Asoc. Geol. Arg.* 9: 135-154.
- Kruck, W; F Helms; M Geyh; M Suriano; H Marengo & F Pereyra. 2011. Late Pleistocene-Holocene history of Chaco-Pampa sediments in Argentina and Paraguay. *Quaternary Science Journal* 60: 188-202.
- Kuppel, S; J Houspanossian; M Nosetto & E Jobbagy. 2015. What does it take to flood the Pampas?. Lessons from a decade of strong hydrological fluctuations. *Water Resour. Res.* 51: 2937-2950.
- Latrubesse, EM & CG Ramonell. 2010. Landforms and chronology in the Pampean Sand Sea, Argentina. En: Abstract Volume. 18th International Sedimentological Congress, Mendoza, Argentina. p. 529.
- León, RJC; GM Rusch & M Oesterheld. 1984. Pastizales pampeanos. Impacto agropecuario. *Phytocoenologia* 12 (2/3): 201-218.
- Lin, HS. 2003. Hydropedology: bridging disciplines, scales, and data. *Vadose Zone Journal* 2: 1-11.
- Lindbo, DL; FE Rhoton; JE Bigham; WH Hudnall; FS Jones; NE Smeck & DD Tyler. 1995. Loess toposequences in the Lower Mississippi River Valley: I. Fragipan morphology and identification. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 487-500.
- Lindbo, DL; FE Rhoton; WH Hudnall; NE Smeck; JM Bigham & DD Tyler. 2000. Fragipan degradation and nodule formation in Glossic Fragiudalfs of the Lower Mississippi River Valley. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1713-1722.
- Lozet, JM & AJ Herbillon. 1971. Fragipan soils of Condroz (Belgium): Mineralogical, chemical and physical aspects in relation with their genesis. *Geoderma* 5: 325-343.
- Marsan, FA & J Torrent. 1989. Fragipan bonding by silica and iron oxides in soils from northwestern Italy. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 53: 1140-1145.
- Martínez, G. 1998. Identificación de paisajes relictuales del Pleistoceno tardío-Holoceno con imágenes ópticas y de radar en el sudeste de la provincia de Buenos Aires. V Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses. Mar del Plata. Actas I., 103-109.
- Matteucci, SD. 2012. Ecorregión Pampa. En: Ecosistemas y Complejos Ecosistémicos Argentinos. J Morello, SD Matteucci, AF Rodríguez & ME Silva (eds.). Capítulo 12, 391-445. Orientación Gráfica Editora.
- McDaniel, PA; MP Regan; E Brooks; J Boll; S Barndt; A Falen; SK Young & JE Hammel. 2008. Linking fragipans, perched water tables, and catchment-scale hydrological processes. *Catena* 72: 166-173.
- Mehra, OP & ML Jackson. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Miner.* 7: 317-327.
- Miaczynski, CRO & JA Ferrer. 1973. Levantamiento semidetallado de suelos en el sector Daireaux-Pirovano. Instituto de Pedología. Facultad de Ciencias Naturales y Museo (UNLP). 46 pp y mapas.
- Miller, MB; TH Cooper & RH Rust. 1993. Differentiation of an eluvial fragipan from dense glacial till in northern Minnesota. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 787-796.
- Morrás, HJM. 2016. Ecología de la meteorización y evolución mineral de los suelos. En: Pereyra, FX & M Torres Duggan (eds.). Suelos y Geología Argentina. Cap. 5, pp 134-158. Buenos Aires.
- Norfleet, ML & DA Karathanasis. 1996. Some physical and chemical factors contributing fragipan strength in Kentucky soils. *Geoderma* 71, 289-301.
- Park, SJ; P Almond; K McSweeney & B Lowery. 2006. Fragipan formation within closed depressions in southern Wisconsin. *Journal of the Korean Geographical Society* 41:150-167.

- Payton, RW. 1983. The micromorphology of some fragipans and related horizons in British soils with particular reference to their consistence characteristics. En: P Bullock & CP Murphy (eds.). *Soil micromorphology: Soil genesis*. pp: 317-335. Rothamsted AB Academic Publishers.
- Payton, RW. 1992. Fragipan formation in argillic brown earths (Fragiudalfs) of the Milfield Plain, north-east England. I. Evidence for a periglacial stage of development. *J. Soil Sci.* 43: 621-644.
- Payton, RW. 1993. Fragipan formation in argillic brown earths (Fragiudalfs) of the Milfield Plain, north-east England. II. Post Devensian developmental processes and the origin of fragipan consistence. *J. Soil Sci.* 44 (4): 703-723.
- Pellegrini, A; D Ferro; D Bennardi; C Genazini & M Vázquez. 2016. Efecto de la acidificación edáfica sobre los aluminosilicatos en un suelo de la Región Pampeana. *Actas XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Río Cuarto, Córdoba. Trabajo No. 153. Edición digital.
- Pérez, SP; EM Sierra; J Irigoien & JM Massobrio. 2009. Detección de cambios abruptos en la precipitación anual del noroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. En: L Fernández Reyes; AV Volpedo & A Pérez Carrera (eds.). *Estrategias integradas de mitigación y adaptación a cambios globales*. PIUBACC & CYTEC. 111-118.
- Ponce, J; J Rabassa; A Coronato & AM Borromei. 2011. Paleogeographical evolution of the Atlantic coast of Pampa and Patagonia from the last glacial maximum to the Middle Holocene. *Biological Journal of the Linnean Society* 103: 363-379.
- Pye, K. 1987. *Aeolian dust and dust deposits*. Academic Press. London. 333 pp.
- Pye, K. 1995. The nature, origin and accumulation of loess. *Quaternary Sci. Rev* 14: 653-667.
- Rabassa, J. 2008. Late Cenozoic Glaciations in Patagonia and Tierra del Fuego. En: Rabassa, J (ed.). *The Late Cenozoic of Patagonia and Tierra del Fuego. Developments in Quaternary Sciences* 11: 151-204. Amsterdam.
- Roger, CDF; TA Dijkstra & IJ Smalley. 1994. Hydroconsolidation and subsidence of loess. *Studies from China, Russia, North America and Europe. Eng. Geol.* 37: 83-113.
- Schaetzl, R & S Anderson. 2005. *Soils. Genesis and Geomorphology*. Cambridge University press. 817 pp.
- Schiavo, HF; A Becker & MP Cantú. 1995. Caracterización y génesis de los fragipanes de la depresión de Curapaligüe. Departamento. Sáenz Peña, Córdoba. Argentina. *Ciencia del Suelo* 13: 28-34.
- Schoeneberger, PJ; DA Wysocki; EC Benham & WD Broderson. 1970. Libro de campaña para descripción y muestreo de suelos. Centro Nacional de Relevamiento de Suelos, Servicio de Conservación de los Recursos Naturales, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Traducción INTA, 2000. Argentina.
- Siragusa, A. 1964. Geomorfología de la provincia de Buenos Aires. *Anales de la Sociedad Argentina de Estudios Geográficos (GAEA)*, 93-122.
- Smalley, IJ & SB Marcović. 2014. Loessification and hydroconsolidation: There is a connection. *Catena* 117: 94-99.
- Smalley, IJ; SP Bentley & SB Marcović. 2016. Loess and fragipans. Development of polygonal-crack-network structure in fragipan horizons in loess ground. *Quatern. Int.* 399: 220-233.
- Smeck, NE; ML Thompson; LD Norton & MJ Shipitalo. 1989. Weathering discontinuities: A key to fragipan formation. En: NE Smeck & EJ Ciolkosz (eds.). *Fragipans: Their occurrence, classification, and genesis. Soil Sci. Soc. Am. Spec. Publ.* Vol. 24: 99-111.
- Soil Survey Division Staff. 1993. *Soil Survey Manual. Handbook No. 18*. Soil Conservation Service, USDA. 437 pp.
- Soil Survey Staff. 1999. *Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. 2nd. edition. NRCS, U.S. Department of Agriculture. 869 pp.
- Soil Survey Staff, 2014. *Keys to Soil Taxonomy*. 12th edition. United States Department of Agriculture. 360 pp.
- Soriano, A; RJC León; OE Sala; RS Lavado; VA Deregibus; MA Cahuepé; OA Scaglia; CA Velázquez & JH Lemcoff. 1992. Rio de la Plata grasslands. En: RT Coupland (ed.). *Ecosystems of the World 8A. Natural grasslands. Introduction and western hemisphere*. Elsevier, New York. pp 367-407.
- Stoops, GJ; V Marcelino & F Mees. 2010. *Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths*. Elsevier Science. 752 pp.
- Steinhardt, GC & DP Franzmeier. 1979. Chemical and mineralogical properties of the fragipans of the Cincinnati catena. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 1008-1013.

- Szymański, W; M Skiba & S Skiba. 2011. Fragipan horizon degradation and bleached tongues formation in Albeluvisols of Carpathian foothills, Poland. *Geoderma* 167/168: 340-350.
- Taboada, MA; F Damiano & RS Lavado. 2009. Inundaciones en la región pampeana. Consecuencias sobre los suelos. En: MA Taboada & RS Lavado (eds.). Alteraciones de la fertilidad de los suelos: el halomorfismo, la acidez, el hidromorfismo y las inundaciones. Universidad de Buenos Aires. Pp 103-127.
- Teruggi, ME. 1957. The nature and origin of Argentine Loess. *J. Sediment. Petrol.* 27: 322-332.
- Tremocoldi, WA; GC Steinhardt & DP Franzmeier. 1994. Clay mineralogy and chemistry of argillic horizons, fragipans, and paleosol B horizons of soils on a loess-thinning transect in southwestern Indiana, USA. *Geoderma* 63: 77-93.
- Tripaldi, A; M Zárate; S Forman; T Badger; M Doyle & P Ciccioli. 2013. Geological evidence for a drought episode in the western Pampas (Argentina, South America) during early-mid 20th century. *The Holocene* 23: 1731-1746.
- Trombotto, D. 1996. The old cryogenic structures of Northern Patagonia: the Cryomere Penfordd. *Z. Geomorph. N.F.* 40 (3):385-399.
- Trombotto, D. 2002. Inventory of fossil cryogenic forms and structures in Patagonia and the mountains of Argentina beyond the Andes. *South African Journal of Science* 98: 171-180.
- Trombotto Liaudat, D; P Wainstein & LU Arenson. 2014. Guía terminológica de la geocriología sudamericana. Vázquez Mazzini Ed. Fundación de Historia Natural Félix de Azara. 128 pp.
- Tsoar, H & K Pye. 1987. Dust transport and the question of desert loess formation. *Sedimentology* 34: 139–153.
- van Vliet-Lanoë, B. 1985. Frost effect on soils. En: J Boadman (ed.). Soils and Quaternary Landscape Evolution. Wiley, Chichester, UK. Pp 117-158.
- van Vliet, B & R Langohr. 1981. Correlation between fragipans and permafrost with special reference to silty Weichselian deposits in Belgium and northern France. *Catena* 8: 137-154.
- Vandenbergue, J. 2013. Grain size of fine-grained windblown sediment: A powerful proxy for process identification. *Earth Sci. Rev.* 121: 18-30.
- Violante, RA; IP Costa; JL Cavallotto; CM Paterlini; S Marcolini & G Bozzano. 2014. Rasgos morfosedimentarios, procesos y evolución de la plataforma continental argentina desde el Último Máximo Glacial. *Rev. Asoc. Geol. Arg.* 71 (2): 292-310.
- Vogt, T & HF Del Valle. 1994. Calcretes and cryogenic structures in the area of Puerto Madryn (Chubut, Patagonia, Argentina). *Geogr. Ann.* 76A (1-2): 57-75.
- Wang, C; JL Nowland & H Kodama. 1974. Properties of two fragipan soils in Nova Scotia including scanning electron micrographs. *Can. J. Soil Sci.* 54: 159-170.
- Wang, X; H Wei; F Khormali; M Taheri; M Kehl; M Frechen; T Lauer & F Chen. 2017. Grain-size distribution of Pleistocene loess deposits in northern Iran and its palaeoclimatic implications. *Quatern. Int.* 429: 41-51.
- Weisenborn, BN & RJ Schaetzl. 2005a. Range of fragipan expression in some Michigan soils: I. Morphological, micromorphological, and pedogenic characterization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 168-177.
- Weisenborn, BN & RJ Schaetzl. 2005b. Range of fragipan expression in some Michigan soils: II. A model for fragipan evolution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 178-187.
- Wilding, LP & H Lin. 2006. Advancing the frontiers of soil science towards a geoscience. *Geoderma*. 131: 257-274.
- Wilson, MA; SJ Indorante; BD Lee; L Follmer; DR Williams; BC Fitch; WM McCauley; JD Bathgate; DA Grimley & K Kleinschmidt. 2010. Location and expression of fragic soil properties in a loess-covered landscape, Southern Illinois, USA. *Geoderma* 154: 529–543.
- Winters, E. 1942. Silica hardpan development in the Red and Yellow Podzolic region. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 7: 437-440.
- Zárate, MA. 2003. Loess of southern South America. *Quaternary Sci. Rev.* 22: 1987-2006.
- Zárate, M & A Blasi. 1993. Late Pleistocene-Holocene eolian deposits of the southern Buenos Aires province, Argentina: a preliminary model. *Quatern. Int.* 17:15-20.
- Zárate, MA & A Tripaldi. 2012. The aeolian system of central Argentina. *Aeolian Res.* 3: 401-417.