

RELACIONES GEOPEDOLÓGICAS Y ANÁLISIS MULTIVARIADO DE LOS ATRIBUTOS EDÁFICOS ASOCIADOS A LAS DUNAS LONGITUDINALES DEL NOROESTE DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES, ARGENTINA

Ileana Ruth PALADINO¹, Julieta IRIGOIN¹, Lucas Martín MORETTI¹ y Gabriela CIVEIRA¹

¹ Instituto de Suelos, Cartografía y Evaluación de Tierras. CNIA-INTA. E-mail: paladino.ileana@inta.gob.ar

RESUMEN

El enfoque geopedológico se refiere a las relaciones entre geomorfología y pedología, en tanto las características geomorfológicas del paisaje condicionan la intensidad de los procesos pedogenéticos y controlan numerosos atributos edáficos. El paisaje del noroeste de Buenos Aires (Argentina) está dominado por dunas longitudinales que inciden en la pedogénesis y originan suelos disímiles coexistiendo en distintos sectores del paisaje. En este trabajo se estudian las relaciones geopedológicas e identifican los atributos edáficos asociados que influyen en la productividad de los suelos. Se analizaron atributos edáficos de series representativas, se calculó el índice de desarrollo pedogenético, se elaboró un modelo geopedológico (unidad cresta, pendiente alta, pendiente baja y depresión interdunaria) y se realizaron análisis multivariados. Los resultados muestran que el grado de desarrollo de los suelos aumenta desde la cresta de la duna hacia las depresiones interdunarias. Los suelos de la cresta de la duna poseen texturas arenosas, en la pendiente pueden encontrarse suelos poligenéticos y en las depresiones interdunarias los suelos presentan alto porcentaje de sodio intercambiable (PSI). Los análisis multivariados agruparon los suelos en relación a su posición en el paisaje, destacando como principales atributos edáficos el contenido de arena, carbono orgánico y PSI. Estos atributos son condicionantes de la productividad agrícola. El análisis geopedológico permitió comprender la organización espacial del paisaje-suelo, en vistas de generar una cartografía de suelos confiable. Desde el punto de vista agronómico, cada unidad geopedológica mostró tener limitantes agronómicas particulares que deben tenerse en cuenta para el uso y manejo de los suelos.

Palabras clave: *Geopedología, suelos, dunas, producción agrícola*

ABSTRACT

Geopedological relations and multivariate analysis of associated edaphic attributes to the longitudinal dunes of the northwest of Buenos Aires province, Argentina

The geopedological approach refers to the relationships between geomorphology and pedology, while geomorphological characteristics regulate the intensity of pedogenetic processes and control numerous edaphic attributes. The landscape of the northwestern Buenos Aires province (Argentina) is dominated by longitudinal dunes that affect the pedogenesis and originate dissimilar soils coexisting in different sectors of the landscape. In this paper we study the geopedological relations and soil attributes associated to agricultural productivity. Representative series soil attributes were analyzed, the pedogenetic development index was calculated, a geopedological model was elaborated (crest of the dune, high slope, low slope and interdunary depression) and multivariate analyzes were performed. The results show that soil development degree increases from the crest of the dune to the interdunary depressions. Soil with sandy textures are present in the dune crest, polygenic soils may be present in the slope position and in the interdunary depressions soils have a high percentage of exchangeable sodium (PSI). The multivariate analyzes grouped soils by their landscape position, highlighting as main edaphic attributes: sand, organic carbon and PSI content. These soil attributes are determinant of agricultural productivity. The geopedological analysis revealed the spatial organization of landscape-soil relations, and this may support reliable soil mapping. From the agronomic point of view, each geopedological unit showed particular limitations that should be taken into account for soil use and management.

Keywords: *Geopedology, soils, dunes, agricultural production*

INTRODUCCIÓN

Las características geomorfológicas de un área constituyen uno de los factores de mayor importancia en la determinación de la distribución de los suelos en el paisaje y explican gran parte de la variabilidad espacial no-aleatoria en la cobertura pedológica (Wilding y Drees 1983, Hall y Olson 1991). Las geoformas involucran tres de los factores de formación de suelos reconocidos en la ecuación de Jenny (1941), la topografía (relieve), la naturaleza del material parental y la edad relativa (morfoestratigrafía).

Pouquet (1966) implementó el enfoque geopedológico para el levantamiento de suelos, particularmente para estudios de erosión y conservación de suelos. La geopedología se refiere a las relaciones entre la geomorfología y la pedología (Zinck 1988, 2012). Esta disciplina posee un fin práctico, dirigido al levantamiento de suelos, para establecer unidades geopedológicas y generar modelos relacionales como por ejemplo: cronosecuencias y toposecuencias (Moretti *et al.* 2016). Las características geomorfológicas del paisaje condicionan la intensidad de los procesos pedogenéticos y controlan numerosos atributos edáficos, tales como, la profundidad del perfil, el contenido de materia orgánica (MO), la textura, la estructura, el grado de diferenciación de horizontes, la reacción del suelo, entre otras (Buol *et al.* 1989, Gerrard 2000). En este sentido, existen diversos índices numéricos para evaluar el desarrollo pedogenético a partir del análisis de atributos edáficos morfológicos de campo y de laboratorio (Bilzi y Ciolkosz 1977, Meixner y Singer 1981, Cumba e Imbellone 1998), los cuales pueden utilizarse para evaluar la intensidad de los procesos pedogenéticos en las distintas posiciones topográficas.

Para substanciar la integración geopedológica y validar cuantitativamente las relaciones entre geoforma y suelo, pueden implementarse técnicas de validación numérica (Zinck 2012). Existen métodos multivariados de interdependencia como el análisis de componentes principales (PCA) el cual permite analizar las relaciones entre variables. Otro método es el

análisis de conglomerados (AC) a partir del cual se puede construir grupos consistentes en función de la semejanza entre variables. Este enfoque numérico está conceptualmente bien adaptado a los métodos y objetivos de la cartografía de suelos (Young y Hammer 2000).

La evolución geomorfológica del noroeste de la provincia de Buenos Aires, se relaciona con la generación de dunas longitudinales durante el Pleistoceno tardío, localmente removilizadas por procesos eólicos más modernos, que formaron dunas longitudinales en el sector norte y parabólicas en el sur (Malagnino 1989, Latrubesse y Ramonell 2010). La superposición de sedimentos determina un paisaje geomorfológico de alta complejidad que incide en la pedogénesis y origina suelos muy disímiles coexistiendo en distintos sectores del paisaje, así como la formación de suelos poligenéticos (Camilión e Imbellone 1984, Imbellone, *et al.* 2010, Imbellone 2011). Sin embargo, sólo existen escasos trabajos que estudien las relaciones geomorfológicas que determinan la distribución de los suelos en este paisaje y su implicancia en el manejo (Cappannini y Domínguez 1961, SAGYP-INTA 1989, Moscatelli 1991).

El análisis de los procesos geopedológicos, resulta relevante debido a que permite comprender la organización espacial del paisaje-suelo, en vistas de generar una cartografía de suelos confiable. Desde el punto de vista agronómico, la interpretación utilitaria de las tierras debería considerar estos aspectos para poder establecer el uso y manejo sostenible del recurso suelo. En este sentido, el objetivo de este trabajo fue estudiar las relaciones geopedológicas en las dunas longitudinales del noroeste de la provincia de Buenos Aires e identificar los atributos edáficos asociados, que influyen en la productividad de sus suelos.

ÁREA DE ESTUDIO

La Pampa arenosa abarca alrededor de 16 millones de hectáreas, repartidas en las provincias de San Luis, Córdoba, La Pampa y Buenos Aires (Viglizzo y Frank

2006). Esta región presenta una dominancia de depósitos eólicos y fue caracterizada como el Mar de Arena Pampeano (Iriundo 1990). En la provincia de Buenos Aires, la Pampa Arenosa está ubicada entre los paralelos 34° 20' y 36° 50' de latitud Sur y entre los meridianos 60° 45' y 63° 20' de longitud Oeste (Cabral *et al.* 1996). El clima actual de este sector es de tipo templado y sub-húmedo, y el promedio de precipitaciones presenta un gradiente desde 900 mm al este a 750 mm al oeste (Sierra *et al.* 1993). Esto produce un cambio gradual en la vegetación, encontrándose pastizales hacia el este y arbustos xerófilos hacia el oeste en el límite con La Pampa (León *et al.* 1979), aunque en la actualidad no existen verdaderos relictos del pastizal original (León *et al.* 1984, Soriano 1992) ya que durante el siglo XX fue transformándose hasta formar parte del actual mosaico agrícola (Hall *et al.* 1992).

El área en estudio comprende el sector más septentrional del noroeste de la provincia de Buenos Aires, donde el paisaje está dominado por dunas longitudinales (Fig. 1). Las dunas longitudinales conforman un sistema de lomadas estrechas y alargadas separadas entre sí por depresiones paralelas. Se caracterizan por exhibir dimensiones de longitud de onda de 4 a 5 km, con una altura inferior a 6 m, longitudes de 100 y 150 km y un ancho variable en las depresiones interdunarias de 1 a 2 km (Malagnino 1989). Estas geoformas se encuentran retrabajadas mayormente como resultado de procesos fluviales, lacunares y eólicos y, actualmente, estabilizadas por vegetación (Malagnino 1991, Dillon y Castronovo 1993). La orientación de las dunas es sudoeste-noreste, dispuestas transversalmente a la pendiente regional. Dicho patrón geomorfológico determina cuencas arreicas caracterizadas por lagunas permanentes y transitorias (Moscatelli 1991).

Para esta región, Dillon *et al.* (1985), identificaron una sucesión de unidades litoestratigráficas y pedoestratigráficas. Los sedimentos inferiores, denominados Formación Carlos Tejedor, son limos arcillosos algo arenosos o limos arcillo-

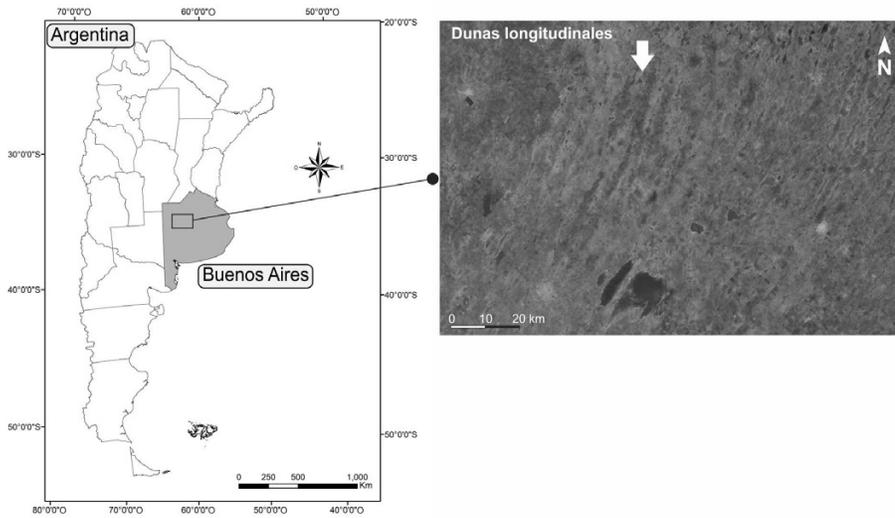


Figura 1: a) Localización del área en estudio en el noroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina; b) Pampa arenosa y ubicación de las dunas longitudinales; c) Imagen Landsat (19/04/2016) de las dunas longitudinales y localización de la cabecera de los partidos del área en estudio.

Los suelos de la unidad se encuentran afectados por procesos pedogenéticos; se describe un paleosuelo denominado Geosol La Maroma el cual se encuentra decapitado y cubierto de manera discordante por la Formación Las Lilas. Los sedimentos que corresponden a la Formación Las Lilas son arenas finas, caracterizadas por una constante homogeneidad litológica, sobre los cuales se desarrolla el suelo actual. Dentro de esta unidad, en algunos sectores, por debajo del suelo actual puede encontrarse un paleosuelo completo preservado por ausencia de ciclo erosivo, denominado Geosol La Cabaña el cual presenta un perfil de escaso desarrollo (Dillon *et al.* 1985, Dillon y Castronovo 1993).

Los suelos dominantes son molisoles, característicos de los ecosistemas de pastizales, los cuales poseen un horizonte superficial oscuro y rico en materia orgánica (SAGYP-INTA 1989). Los molisoles de la región poseen en su mayoría un régimen hídrico údico y régimen de temperatura térmico (Díaz-Zorita *et al.* 2002). En menor porcentaje hay suelos de los órdenes entisoles y alfisoles (Soil Survey Staff 2010), los primeros son suelos jóvenes, de escaso desarrollo, los segundos, por el contrario, son suelos con un horizonte de acumulación de arcillas que

en la región presentan altos niveles de sodio de intercambio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó la información de la carta de suelos a escala 1:50.000, perteneciente a cuatro partidos de la Pampa Arenosa: 9 de Julio, Carlos Casares, Pehuajó y Trenque Lauquen (SAGPYA-INTA 1974-1997). Se analizaron en total 31 Series de suelo pertenecientes a 10 subgrupos taxonómicos (Soil Survey Staff 2010), que fueron considerados debido a su mayor representatividad en relación al porcentaje superficial que ocupan en la zona en estudio (Cuadro 1).

Por otro lado, para caracterizar los subgrupos taxonómicos se seleccionó una Serie a modo de ejemplo. Se tomaron en consideración atributos edáficos físicos y químicos, la secuencia de horizontes de las 10 Series seleccionadas, y la variabilidad de clases texturales dentro de cada subgrupo taxonómico (Cuadro 2).

Se calculó el índice de desarrollo pedogenético (ID) a partir de datos morfológicos de cada horizonte presentes en las descripciones de las Series seleccionadas (Cumba e Imbellone 1998).

Para elaborar el modelo geopedológico, se interpretó la información de paisaje y la

CUADRO 1: Suelos analizados correspondientes a los partidos de 9 de Julio, Carlos Casares, Pehuajó y Trenque Lauquen de la provincia de Buenos Aires.

Subgrupos taxonómicos	Serías
Ustipsament típico (UST) n=1	Estancia San Bernardo
Udipsament típico (UDT) n=2	25 de Mayo, La Guanaca
Hapludol cumúlico (HC) n=1	Estación González Moreno
Hapludol éntico (HE) n=5	Norumbega, Bolívar, Del Valle, Piedritas, Estancia La Angelita
Hapludol típico (HT) n=5	Estación Naón, Bragado, Lincoln, Carlos Tejedor, Pehuajó
Hapludol thapto árgico (HTA) n=5	Ortiz de Rosas, Estación Morea, 9 de Julio, Saladillo, Cañada Seca
Hapludol thapto nátrico (HTN) n=3	Carlos Salas, Pichincha, La Albina
Natralbol típico (NALB) n=3	Estación Dennehy, Morse, Patricios
Natracuol típico (NACU) n=3	Santa Rita, Drabble, Estancia La Chana
Natracualf típico (NALF) n=3	Estación 12 de octubre, Estación La Limpia, Vedia

n: corresponde al número de series analizadas por subgrupo taxonómico.

descripción morfológica y analítica de los suelos, utilizando además información publicada referida a las relaciones catenarias (Moscatelli 1991, Cabral *et al.* 1996). Se realizaron dos análisis multivariados (AC y PCA) con los datos analíticos de todo el perfil para todos los suelos (n=31). Las variables analizadas fueron: arena 2000-50 μm (g Kg^{-1}), limo 2-50 μm (g Kg^{-1}), arcilla $<2 \mu\text{m}$ (g Kg^{-1}), porcentaje de sodio intercambiable (PSI: %), carbono orgánico (CO: g Kg^{-1}), suma de bases (SB: cmolc Kg^{-1}), capacidad de intercambio catiónico (CIC: cmolc Kg^{-1}), coeficiente de capacidad de campo (CC, -33 KPa) y coeficiente de punto de marchitez permanente (PMP, -1500 KPa), estas dos últimas variables estimadas a partir de funciones de pedotransferencia (Rawls *et al.* 1982). Los datos fueron evaluados utilizando el programa Info Stat (Di Rienzo

CUADRO 2: Atributos edáficos de las series seleccionadas.

Serie	Horizontes	Profundidad (cm)	MO (g Kg ⁻¹)	CIC (cmolc Kg ⁻¹)	SB (cmolc Kg ⁻¹)	PSI (%)	pH (H ₂ O)	Arena 50-2000 μm	Limo 2-50 μm (g Kg ⁻¹)	Arcilla < 2 μm (g Kg ⁻¹)	clase textural (g Kg ⁻¹)	clase textural del subgrupo taxonómico
Estancia San Bernardo (UST)	Ap	0-30	9,1	7,4	6,6	4,1	6,5	842	80	78	AF	AF
	A	30-50	7,2	9,3	8,3	3,2	6,5	776	131	93	FA	FA
	AC	50-80	6,0	8,8	8	3,4	6,5	817	96	87	AF	AF
	C	80-110	2,9	7,8	7,4	5,1	6,6	808	114	78	AF	AF
25 de Mayo (UDI)	A	0-25	5,5	5,9	6,1	0,7	7	870	54	76	AF	A-FA
	AC	25-55	4,5	5,6	5,8	1,3	7	851	83	66	AF	A-FA
	C	55-120	1,7	5,5	6,2	2,9	7,4	896	40	64	A	A
Estación González Moreno (HC)	Ap	0-15	17,0	11,4	11,2	1	7,5	612	277	111	FA	FA
	A	15-40	10,9	10	8,7	4	7,7	639	245	116	FA	FA
	2Ab	40-83	12,8	12,7	11,2	7	6,8	670	194	136	FA	FA
	2ACb1	83-110	5,3	11,1	9,7	4	7,2	721	151	128	FA	FA
	2ACb2	110-150	2,7	8,8	S/D	5	8,3	732	150	118	FA	FA
Norumbega (HE)	2C	150-170	2,2	5,4	S/D	7	8,5	786	146	68	AF	AF
	A	0-25	13,2	12,9	11,6	1,4	6,5	652	201	147	FA	AF-FA-FaA
	AC	25-50	5,0	10,5	10,4	4,7	6,9	651	193	156	FA	A-AF-FA-FaA
	C	50-100	2,4	11,5	10,5	1,7	6,5	712	153	135	FA	A-FA
Estación Naón (HT)	Ap	0-15	38,6	18,8	14,5	1,5	6,6	564	270	166	FA	FA-FaA
	A	15-30	25,0	15,8	14,1	1,9	6,6	567	265	168	FA	FA-FaA
	Bw	30-48	11,9	13,7	12,3	2,2	6,8	579	235	186	FA	FA-FaA
	BC	48-69	9,7	12,6	11	2,4	7	617	197	186	FA	FA-FaA
	C	69-80	7,1	12,6	10,5	2,4	7,3	488	245	267	FaA	FA-FaA
Ortiz de Rosas (HTA)	Ap	0-23	24,8	15,7	14,8	2,5	6	492	359	149	F	F
	A	23-35	22,0	15,7	14,2	3,8	6,2	459	368	173	F	FA-F
	AC	35-55	4,9	9,5	9	5,3	6,6	573	294	133	FA	FA-F
	2Btb	55-73	3,8	19,5	18	2,1	6,8	472	233	295	FaA	FA-FaA-Fa
	2BCb	73-110	2,6	17,7	17,9	3,9	7,6	537	212	251	FaA	FA-FaA-F
	2Ck	110-120	1,2	19,3	S/D	7,8	8,5	472	318	210	F	FA-F
La Albina (HTN)	A	0-35	20,8	11,3	12	4	6,7	623	235	142	FA	FA
	ACn	35-55	5,3	9,5	11,5	15	7,1	624	238	138	FA	FA
	2Btbn	55-80	2,4	13,1	15,5	26	7,9	665	102	233	Fa	FaA-Fa
	2BCknb	80-100	1,3	15,7	10,4	26	8,8	629	109	262	Fa	FA-F
	2Cn	100-140	S/D	8,1	S/D	30	8,1	750	138	112	FA	FA
Morse (NALB)	A	0-21	24,4	15,7	14	8	6,6	287	471	242	F	FA-F
	E	21-28	7,5	14,59	14,6	12	7,8	311	453	236	F	FA-F
	Btn1	28-55	5,8	31,9	S/D	30	8,6	256	344	400	Fa	FaA-Fa
	Btn2	55-88	2,5	30,5	S/D	19	8,7	303	356	341	Fa	FaA-Fa
	BCn	88-102	1,3	17,6	S/D	24	8,9	382	393	225	F	FA-F
Drabble (NACU)	An	0-22	19,3	11,2	11,2	29	8	548	352	100	FA	FA
	Btn	22-44	8,6	30,9	30,9	35	8,9	368	266	366	Fa	FA-FaA-Fa
	BCnx	44-72	2,7	23,7	S/D	51	9	370	424	206	F	FA-FaA-F
	Cnx	72-105	1,2	19,8	S/D	44	8,9	402	422	176	F	FA-F
Estación La Limpia (NALF)	A	0-18	26,8	11,5	13,2	13	6,5	612	260	128	F	FA-F
	2Btbn	18-43	6,7	21,6	21,6	24	8,5	485	142	373	aA	Fa-aA-a
	2BCknxb	43-63	1,4	16,3	S/D	33	9,4	570	268	162	FA	FA-F

MO: materia orgánica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, SB: suma de bases, PSI: porcentaje de sodio intercambiable, pH(H₂O): reacción del suelo (dilución 1:2,5), S/D: sin dato, A: arenoso, AF: areno-franco, FA: franco-arenoso, FaA: franco-arcillo-arenoso, F: franco, Fa: franco-arcilloso, aA: arcillo-arenoso, a: arcilloso.

et al. 2015). Para el AC se utilizó el método jerárquico promedio y la distancia euclídea, con el fin de obtener grupos de suelos según la homogeneidad en sus atributos edáficos (variables) y vincularlos con las unidades geopedológicas previamente determinadas. Posteriormente, se rea-

lizó un PCA para facilitar la interpretación de los agrupamientos obtenidos y distinguir los atributos edáficos relevantes. Este análisis construye un nuevo conjunto de variables no correlacionadas y adimensionales (las componentes principales: CP). Los autovalores obtenidos ha-

cen referencia a la variabilidad total explicada por cada CP. Los autovectores (AV) son los coeficientes con que cada variable original fue ponderada para conformar las CP y, por lo tanto, muestran la incidencia que presentó cada variable en la definición de los ejes de las CP.

RESULTADOS

Modelo geopedológico

El análisis de la distribución de subgrupos taxonómicos de suelos en el paisaje de dunas longitudinales del noroeste de la provincia de Buenos Aires permite proponer un modelo geopedológico con cuatro unidades: cresta de la duna, pendiente alta, pendiente baja y depresión interdunaria (Fig. 2).

Atributos edáficos: Al analizar las clases texturales se observa que los contenidos de arena disminuyen desde la cresta de la duna hacia la depresión interdunaria y, en consecuencia, los contenidos de limo y arcilla aumentan en el mismo sentido (Fig. 2 y Cuadro 2). Esta tendencia también se observa en los valores de CIC y SB que son más bajos en los suelos de texturas más arenosas. Sin embargo, la totalidad de los suelos presenta una saturación básica (SB/CIC%) superior al 50% (Cuadro 2).

Los suelos en la unidad cresta de la duna presentan contenidos elevados de arena a lo largo de todo el perfil, escaso desarrollo pedogenético y pertenecen a los órdenes Entisol (UST y UDT) y Molisol (HE y HC). Los primeros con un contenido de MO menor al 1%, los segundos con epipedones más oscuros y algo más enriquecidos en MO. Se destaca la Serie Estación González Moreno (HC) por presentar un horizonte A enterrado con tenores de MO superiores a 1% hasta los 80 cm (Cuadro 2).

La unidad geopedológica de la pendiente, puede dividirse en pendiente alta y pendiente baja, según sean suelos mono o poligenéticos. En la pendiente alta se ubican los HT, estos son suelos más profundos y con un horizonte Bw con cierto aumento en el contenido de arcilla, respecto a los suelos de la cresta. Para el caso de la Serie Estación Naón se observa un enriquecimiento importante en el contenido de MO en el horizonte A y un incremento en el contenido de arcilla y limo del horizonte subsuperficial respecto de los suelos HE que se hayan contiguos hacia la cresta de la duna (Cuadro 2). En la pendiente baja, el depósito superficial de material arenoso disminuye su espesor

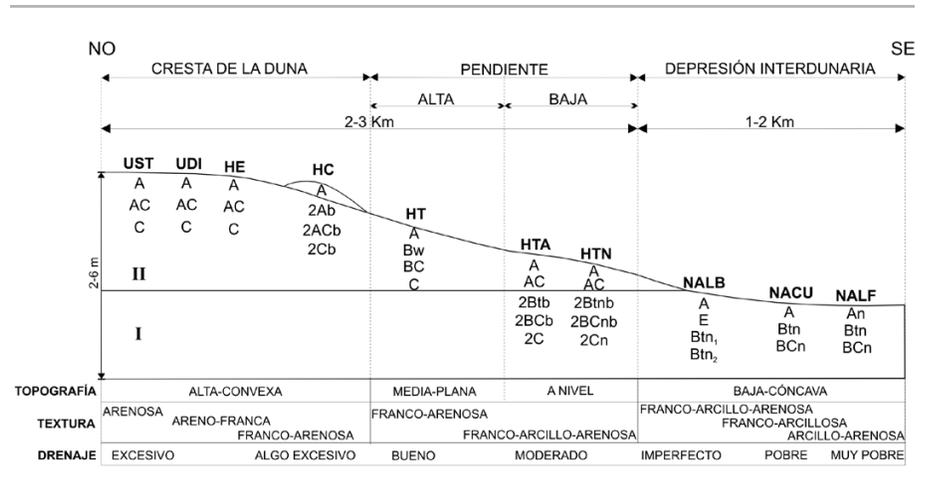


Figura 2: Modelo geopedológico para las dunas longitudinales del noroeste de la provincia de Buenos Aires. I: Formación Carlos Tejedor, II: Formación Las Lilas (Dillon et al. 1985).

de PSI superiores a 13% en todos los casos a partir de 20 cm siendo muy superior a 15% en el horizonte subsuperficial. Asimismo, los horizontes Btn presentan un pH superior a 8,5 que se condice con los valores de PSI encontrados.

Índice de desarrollo pedogenético (ID): En la cresta de la duna, las series representativas de los subgrupos taxonómicos UST (Estancia San Bernardo), UDT (Veinticinco de Mayo), HC (Hapludol cumúllico) y HE (Norumbega), presentan evidencia de un mayor desarrollo a nivel superficial, con valores del ID comprendidos entre 0,35 y 0,52, que disminuyen en profundidad, excepto en los casos con horizontes A enterrados (2Ab en Fig. 2) donde se observa que estos horizontes tienen mayor desarrollo que los A superficiales (Figs. 3a,b,c,d). En la pendiente alta, la Serie Estación Naón (HT) presenta una curva de ID cuyo valor máximo de 0,55 se encuentra en el horizonte subsuperficial Bw (Fig. 3e). En la pendiente baja las Series Ortiz de Rosas (HTA) y La Albina (HTN) presentan una curva de ID que parte de un valor superficial cercano a 0,45, luego en el horizonte subsiguiente disminuye a valores menores a 0,3 para aumentar en los horizontes 2Btb y 2Btbn a valores mayores a 0,6 (Fig. 3f y g). Los suelos ubicados en la depresión interdunaria correspondientes a las Series: Morse (NALB), Drabble (NACU) y Estación La Limpia (NALF) presentan el valor más elevado de ID (cercano a 0,7) en el

de PSI superiores a 13% en todos los casos a partir de 20 cm siendo muy superior a 15% en el horizonte subsuperficial. Asimismo, los horizontes Btn presentan un pH superior a 8,5 que se condice con los valores de PSI encontrados.

Índice de desarrollo pedogenético (ID): En la cresta de la duna, las series representativas de los subgrupos taxonómicos UST (Estancia San Bernardo), UDT (Veinticinco de Mayo), HC (Hapludol cumúllico) y HE (Norumbega), presentan evidencia de un mayor desarrollo a nivel superficial, con valores del ID comprendidos entre 0,35 y 0,52, que disminuyen en profundidad, excepto en los casos con horizontes A enterrados (2Ab en Fig. 2) donde se observa que estos horizontes tienen mayor desarrollo que los A superficiales (Figs. 3a,b,c,d). En la pendiente alta, la Serie Estación Naón (HT) presenta una curva de ID cuyo valor máximo de 0,55 se encuentra en el horizonte subsuperficial Bw (Fig. 3e). En la pendiente baja las Series Ortiz de Rosas (HTA) y La Albina (HTN) presentan una curva de ID que parte de un valor superficial cercano a 0,45, luego en el horizonte subsiguiente disminuye a valores menores a 0,3 para aumentar en los horizontes 2Btb y 2Btbn a valores mayores a 0,6 (Fig. 3f y g). Los suelos ubicados en la depresión interdunaria correspondientes a las Series: Morse (NALB), Drabble (NACU) y Estación La Limpia (NALF) presentan el valor más elevado de ID (cercano a 0,7) en el

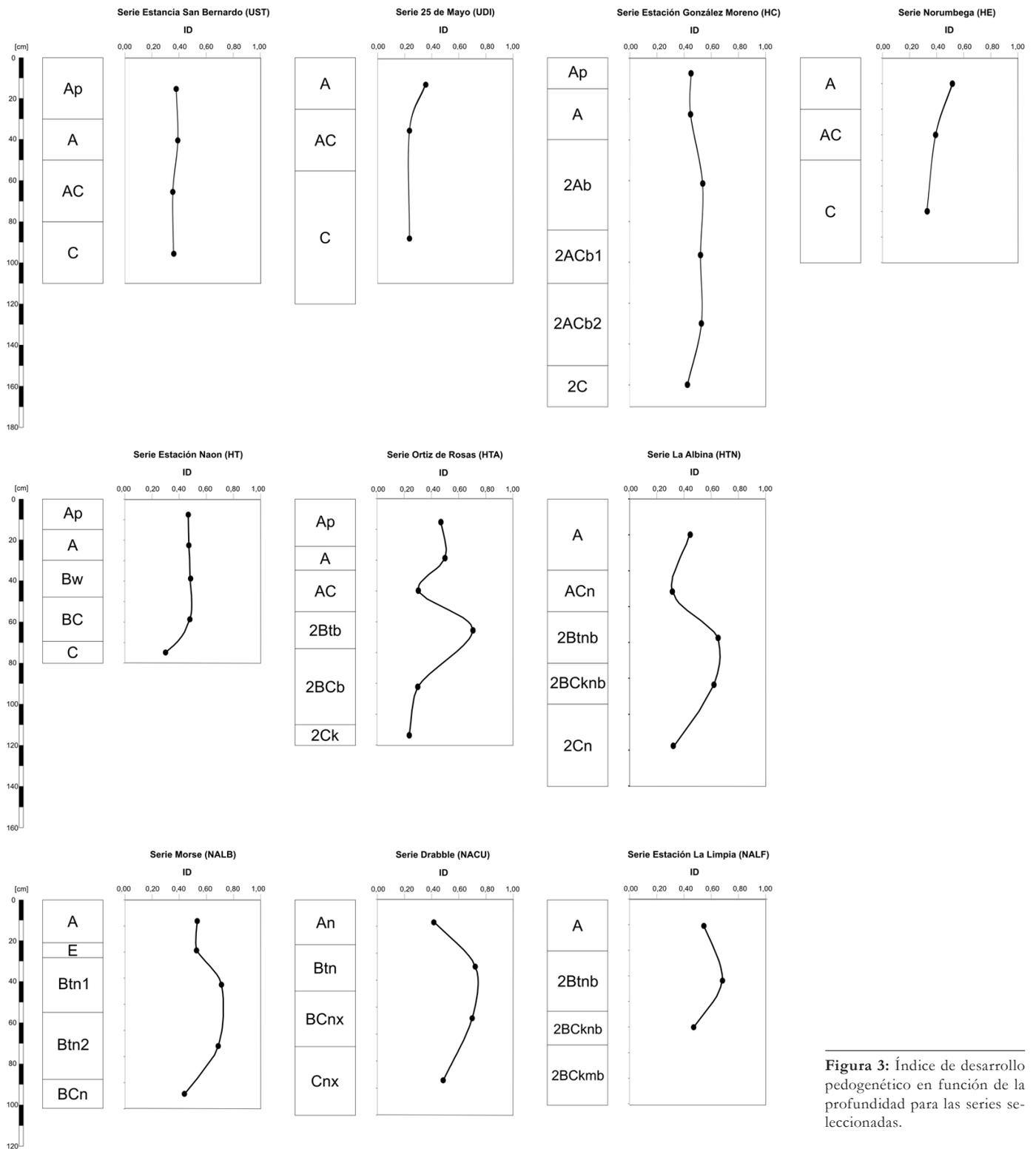


Figura 3: Índice de desarrollo pedogenético en función de la profundidad para las series seleccionadas.

horizonte Btn (Fig. 3h,i).

Análisis Estadísticos

El AC permite considerar conjuntamente variables físicas y químicas de los 31 per-

files de suelos, separando grupos de suelos disímiles entre sí. Los suelos dentro de un mismo grupo comparten el mayor número permisible de características y tienden a ser distintos a los contenidos en los

otros grupos. Este análisis multivariado muestra que los agrupamientos de suelos analizados siguen un ordenamiento en el paisaje en concordancia con el modelo geopedológico propuesto (Fig. 4).

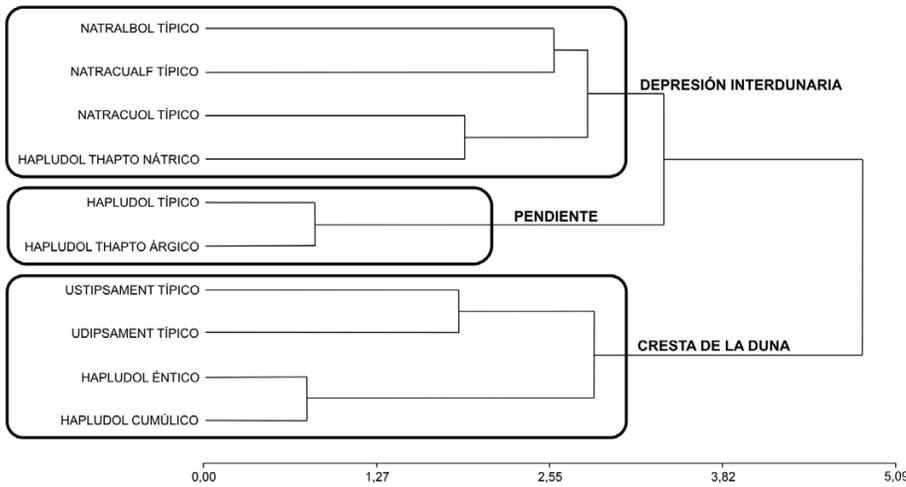


Figura 4: Dendrograma de similitud.

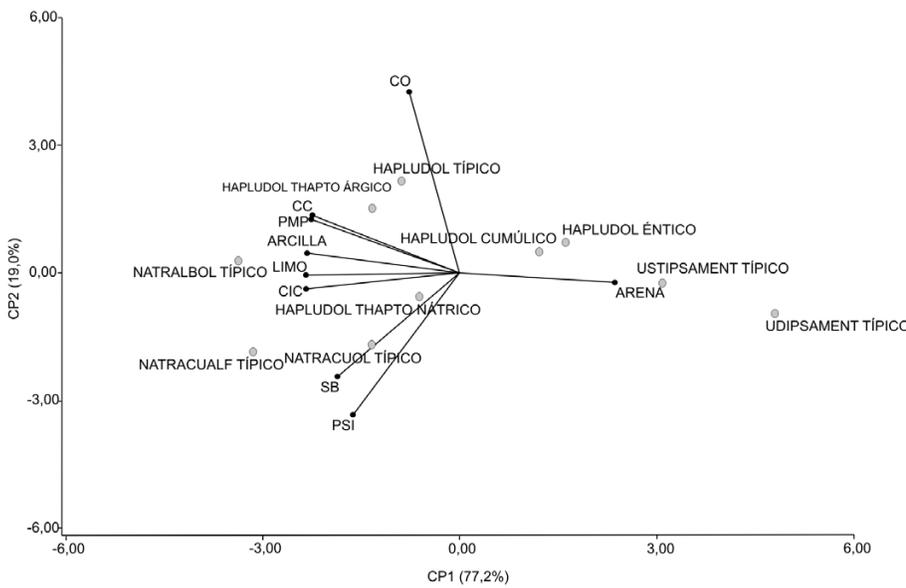


Figura 5: Gráfico de componentes principales.

Un primer grupo se separa del resto de los suelos a una distancia euclidiana de 4,83 y está integrado por suelos ubicados en la cresta de la duna (UST, UDT, HC y HE) (Fig.4). El resto de los suelos se separa en un segundo nivel a una distancia euclidiana de 3,43 quedando agrupados suelos con altos contenidos de sodio (HTN, NALB, NACU y NALF), ubicados en la depresión interdunaria, y por otro lado los suelos ubicados en la pendiente (HT y HTA) (Fig. 4). El PCA permite identificar los atributos edáficos de mayor relevancia para caracterizar a las unidades geopedológicas y distinguir cuáles son las limitantes para la

producción agrícola en cada caso. El CP1 explica el 77% de la variación de los datos y el CP2 el 19 %, y ambos explican el 96% de la variabilidad total (Fig. 5). En el CP1, la mayoría de las variables presentan valores similares en los AV, con excepción del CO, la SB y el PSI que presentan valores menores; destacándose que la única variable con distinta direccionalidad fue la arena (Cuadro 3). En la figura 5 se observa que el CP1 logra ordenar los suelos según la textura. Este ordenamiento coincide en gran medida con la distribución de las unidades geopedológicas que siguen el escalonamiento topográfico desde la cresta de la duna (con suelos

CUADRO 3: Autovectores de las variables en cada componente principal.

Variables	AV1	AV2
CO	-0,12	0,68
ARCILLA	-0,37	0,08
LIMO	-0,38	-0,01
PSI	-0,26	-0,53
SB	-0,30	-0,39
CIC	-0,38	-0,06
ARENA	0,38	-0,03
CC	-0,36	0,21
PMP	-0,36	0,22

AV1: autovectores de las variables en el CP1, AV2: autovectores de las variables en el CP2.

más arenosos) hasta la depresión interdunaria (con suelos de textura más fina). El CP2 ordena los suelos en función del grado de afectación con sodio (PSI) y el contenido de CO. Los suelos menos sódicos y con mayor contenido de CO se ubican en los cuadrantes superiores y los suelos sódicos con menos CO en los inferiores del gráfico (Cuadro 3, Fig. 5).

DISCUSIÓN

Relaciones geopedológicas

El modelo geopedológico propuesto exhibe la distribución de los suelos en el paisaje, y vinculado a esto, la variación granulométrica desde la cresta de la duna hasta la depresión interdunaria, como resultado de procesos geomorfológicos y pedológicos. Desde el punto de vista geomorfológico, la distribución granulométrica responde a la acción combinada de procesos eólicos y subcúneos que determinaron el aporte del material arenoso y la redistribución del mismo en función de las variaciones topográficas del relieve (Imbellone *et al.* 2010). Por otro lado, durante la pedogénesis ocurrieron modificaciones en la granulometría, debido a migraciones dentro del perfil y a procesos de alteración y síntesis de minerales secundarios. Las variaciones verticales en la textura pueden atribuirse también a la presencia de discontinuidades litológicas y pedológicas en la pendiente baja del paisaje como se observa en los HTA y HTN. La posición topográfica elevada y la textura arenosa a franco arenosa de los suelos ubicados en la cresta de la duna, ge-

neran condiciones que no propician la retención hídrica y, por consiguiente, tampoco la pedogénesis (Pereyra 2016). Por tal motivo, los contenidos de MO son bajos como consecuencia de un menor aporte de biomasa vegetal y una mayor oxidación (Imbellone *et al.* 2010). El desarrollo pedogenético es limitado en estas posiciones, lo cual se observa en los resultados del ID y en la profundidad del solum, presentando los valores más bajos de los suelos estudiados (Figs. 3a-d, Cuadro 2). Se destaca como proceso pedogenético principal en este sector del paisaje a la melanización, la cual es más intensa en superficie y disminuye en profundidad tal como se observa en las curvas del ID. Asimismo, la morfodinámica eólica activa reciente en estas posiciones determinó la presencia de suelos cumúlicos con horizontes A enterrados en períodos relativamente recientes.

En la unidad pendiente alta, la textura algo más fina favorece la pedogénesis y, por lo tanto, el desarrollo de suelos más profundos, en comparación con los suelos de la cresta de la duna. El contenido de MO se incrementa y en consecuencia también la melanización, por tal motivo el ID en superficie es mayor que en los suelos de la cresta. Asimismo, a diferencia con los suelos de la cresta, el ID se mantiene en el horizonte subsuperficial Bw (Fig. 3e). En este horizonte, el proceso de empardecimiento (o brunificación) genera un cambio de color que incide en el ID. También el índice aumentó debido a un mayor desarrollo estructural lo cual se relaciona, en parte, al incremento en el contenido de arcilla probablemente por neoformación, ya que no se observan cutanes de iluviación.

La unidad de pendiente baja se destaca por la presencia de suelos poligenéticos. En estos suelos, el material superficial de más reciente deposición, presenta un enriquecimiento de MO mayor en superficie que disminuye hasta el contacto con el horizonte enterrado, y un desarrollo morfológico vinculado fundamentalmente a la humificación. A profundidades variables de acuerdo con la posición topográfica, se presentan horizontes ilu-

viales formados en un período pedogenético anterior, con mayores contenidos de arcilla que los horizontes Bw, mayor desarrollo estructural y barnices abundantes que se condicen con los altos valores del ID alcanzados (Figs. 3f,g, Cuadro 2). Los horizontes 2Btb y 2Btb tienen entre 15 a 30% de arcilla, esto genera un incremento en la capacidad de retención hídrica y a su vez un cambio abrupto en la conductividad hidráulica, condicionando el drenaje y el crecimiento radical (Díaz-Zorita *et al.* 2002).

En la unidad depresión interdunaria, el relieve es plano a plano-cóncavo. En esta unidad el enriquecimiento en materiales finos y el mayor aporte de agua intensifican algunos procesos pedogenéticos característicos. Imbellone *et al.* (2010), afirman que, en algunos sectores, hay influencia de los ciclos pedogenéticos más modernos sobre los más antiguos, por lo que los rasgos de argiluvación y los contenidos de arcilla se ven incrementados. En concordancia con lo anterior, en los suelos analizados los valores de ID aumentan desde la superficie hasta el horizonte Btn (Figs. 3h,i). Asimismo, en esta unidad se observan rasgos de hidromorfismo y sodificación que se vinculan a la escasa pendiente regional, sumado a la disposición de las dunas longitudinales que funcionan como impedimentos topográficos locales y hacen que el escurrimiento superficial regional sea ínfimo. Por tal motivo, durante los períodos de máximas precipitaciones, el agua ocupa estas depresiones y se generan, como consecuencia, condiciones para el desarrollo de procesos hidromórficos. El anegamiento también es provocado por el ascenso de los niveles freáticos (Cabral y Hurtado 1990) y la impermeabilidad o escasa permeabilidad de los horizontes Btn (Myaczinski 1995). Por su parte, las evidencias de sodificación están asociadas en muchas zonas con rasgos de hidromorfismo. La presencia de sodio en los suelos de este sector del paisaje es variable en cantidad y profundidad, pero en todos los casos presenta valores por encima del 15% de PSI para el horizonte subsuperficial (Cuadro 2). La presencia de

sodio en el perfil estaría vinculada a las aguas de los ríos y arroyos que atraviesan o nacen en el territorio y con las capas de agua subsuperficiales (Myaczinski 1995). Del análisis geopedológico se desprende que existe gran variabilidad espacial en las características genéticas y productivas de los suelos, la cual no es distinguible sin un análisis exhaustivo del paisaje. En este sentido, los resultados obtenidos son de utilidad para la elaboración de una cartografía confiable que sirva de apoyo al manejo agronómico.

Relaciones estadísticas

La abundancia de arena de los suelos ubicados en la cresta de la duna, puede considerarse como el atributo edáfico de mayor relevancia para diferenciar este grupo del resto, constituyendo la variable limitante para la productividad agrícola en esta unidad (Figs. 2, 4 y 5). En este sentido, la textura promueve un drenaje excesivo a algo excesivo (escasa retención de humedad) y también establece una baja fertilidad química (escasa SB), debido a la presencia de minerales más estables y poco activos que predominan en la fracción arena, todo lo cual condiciona el crecimiento vegetal. La cantidad de agua disponible para el cultivo se relaciona, entre otros aspectos edáficos, con su textura. Álvarez *et al.* (2009) determinaron en suelos UST, HE y HT de la región de la Pampa arenosa una capacidad máxima de agua disponible para las plantas es de alrededor de 70, 90 y 120 mm por metro de suelo, respectivamente. Asimismo, encontraron que los suelos con mayor contenido de humedad durante los estadios críticos de definición de rendimiento del cultivo de soja, presentaron un aumento en la producción de grano (Álvarez *et al.* 2009). Díaz-Zorita y Davis (1995) afirman que la mayor humedad que almacenan los HT favorece la actividad biológica lo cual produce un incremento en el CO en periodos bajo pasturas. Además, el mayor contenido de arcillas de los HT respecto de HE protege el CO acumulado de la oxidación.

Los suelos ubicados en la depresión interdunaria se caracterizan por la presencia

de sodio en el complejo de intercambio (Fig. 4). La presencia de sodio provoca la dispersión de la arcilla y la materia orgánica, cuya consecuencia es la compactación de los suelos que se tornan duros en seco e impermeables en húmedo. La situación consignada afecta el crecimiento y desarrollo de muchas especies vegetales al limitar el crecimiento de las raíces por la resistencia mecánica y falta de aireación en el suelo. Además, el pH elevado genera problemas de disponibilidad de algunos nutrientes tales como el fósforo y los microelementos (Casas y Pittaluga 1990). Por lo tanto, el alto contenido de sodio es la mayor limitante al momento de plantear un manejo específico para este sector del paisaje. En este grupo merecen especial atención los suelos HTN. Estos suelos comparten características genéticas con los HTA, ya que ambos tipos de suelos presentan discontinuidades litológicas y rasgos atribuibles al proceso de argiluvación en los horizontes enterrados, por tal motivo fueron incluidos en la unidad de pendiente dentro del modelo geopedológico (Fig. 2). Sin embargo, los HTN tienen un marcado proceso de sodificación que determina la presencia de características limitantes para la producción agrícola. Este proceso caracteriza a los suelos ubicados en la depresión interdunaria, hecho que explica la inclusión de los HTN dentro de este grupo en el AC, lo cual puede ser de utilidad para planificar un manejo agrícola eficiente. El manejo de estos suelos debe considerar la utilización de rotaciones de cultivos, sistemas adecuados de pastoreo y prácticas mecánicas de control del escurrimiento para evitar o disminuir el anegamiento y el agravamiento de la sodificación en épocas húmedas especialmente (Casas y Pittaluga 1990). En este sentido el AC, logra detectar semejanzas entre suelos ubicados en diferentes posiciones topográficas, donde la sodificación tuvo un rol primordial en la evolución de los mismos. De este modo, queda en evidencia que pequeñas diferencias en el relieve pueden condicionar la génesis de los suelos y consecuentemente sus características productivas. Yang *et al.* (1998) des-

criben relaciones entre productividad de cultivos y posición en el relieve.

Los suelos HT y los HTA agrupados por el AC (Fig. 4), conforman una unidad heterogénea respecto de los materiales que la componen. Por tal motivo se realizó una subdivisión en el modelo geopedológico en la pendiente alta (HT) y baja (HTA, HTN) (Fig. 2). Cabe aclarar que existen atributos edáficos físicos y químicos comunes entre los HT y los HTA, tales como buena provisión de MO y fertilidad natural, buena retención de humedad y bajo PSI. En este sentido el AC, al analizar un número considerable de variables físicas y químicas, logra agrupar suelos que coinciden en sus características productivas. Los suelos HTA debido a la presencia de un horizonte subsuperficial de mayor proporción de arcillas presentan mayor capacidad de almacenaje de agua lo cual constituye una ventaja para el crecimiento de los cultivos (Álvarez *et al.* 2009). No obstante, en años secos es frecuente observar correlaciones estrechas entre el rendimiento y la profundidad de los horizontes 2Btb ya que en tales condiciones estos horizontes funcionan como una limitante física para el crecimiento radical condicionando la productividad (Díaz-Zorita *et al.* 2002).

Ambos análisis multivariados muestran a la textura como el atributo que mejor caracteriza la relación paisaje-suelo en la región analizada, ya que la misma varía en igual sentido que el escalonamiento topográfico que siguen las unidades geopedológicas.

En el CPI otros atributos como CIC, CC, y PMP tuvieron AV similares a la arena (Fig. 5, Cuadro 3), esto se relaciona a que estas variables se encuentran fuertemente condicionadas por la textura. El CP2 muestra que, para suelos de igual textura, cobran importancia otros atributos para caracterizar las unidades geopedológicas, estos son CO y PSI. Los suelos ubicados en el sector de pendiente se caracterizan por presentar mayores contenidos de CO y los ubicados en la depresión interdunaria se caracterizan por presentar tenores de sodio elevados que limitan la producción de cultivos agrícolas, por lo que en

general son áreas destinadas a la producción de pasturas.

Irigoin (2011), al analizar los patrones espaciales de los suelos en el área de estudio, evidenció la incidencia de la geomorfología regional sobre el tipo de limitaciones de los suelos. La textura, el drenaje y la presencia de alcalinidad en el perfil del suelo gobiernan el tipo de limitación presente en esta región. Estas limitaciones están íntimamente relacionadas a la posición topográfica que condiciona las características intrínsecas de los suelos (Moscatelli 1991). Sin embargo, la relación entre los factores topográficos y los rendimientos de los cultivos varía entre sitios y años pudiendo ser de mayor relevancia en años con condiciones extremas de clima (Kravchenko y Bullock 2000).

CONCLUSIONES

El modelo geopedológico muestra la importancia de los rasgos geomorfológicos en la distribución de los suelos en el paisaje de las dunas longitudinales en el noroeste de la provincia de Buenos Aires. Para cada unidad geopedológica se interpretan procesos pedogenéticos específicos con distinta intensidad, que determinan la presencia de suelos con distinto desarrollo (evidenciado en el ID) y atributos edáficos físicos y químicos. Los análisis multivariados permiten agrupar suelos en relación a su posición en el paisaje, destacando los atributos físicos y químicos principales que condicionan su productividad agrícola. Queda evidenciado que pequeñas diferencias en el relieve pueden condicionar la génesis de los suelos y, consecuentemente, sus características productivas. La textura constituye el atributo edáfico más importante para agrupar suelos similares vinculados con su posición topográfica. Por otro lado, en sectores del paisaje donde la textura es similar cobra importancia el carbono orgánico y el porcentaje de sodio intercambiable.

El trabajo realizado muestra que el análisis geopedológico constituye una herramienta particularmente idónea para

la comprensión de los factores y procesos que determinan la distribución de los suelos en el paisaje, siendo de utilidad para la cartografía de suelos. El uso de herramientas estadísticas facilita la identificación de los atributos edáficos más relevantes en la diferenciación de los suelos y el reconocimiento de las principales limitantes para la producción agrícola en cada caso. Se destaca que ambos análisis, geopedológico y estadístico, muestran consonancia en sus resultados. Complementariamente, se considera necesario realizar análisis genéticos específicos (mineralógicos, micromorfológicos, entre otros) para profundizar en el estudio de las relaciones geopedológicas que explique la variabilidad de los suelos de la región.

AGRADECIMIENTOS

Los editores de la RAGA agradecen el trabajo de los revisores Perla Amanda Imbellone y Pablo Bouza.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Álvarez, C., Barraco, M. y Scianca, C. 2009. Efecto de las condiciones sitio-específico sobre la productividad y variabilidad de los cultivos en la región de la Pampa Arenosa. Jornada Agrofutura. Trenque Lauquen, 3 de Septiembre de 2009. INTA Estación Experimental Agropecuaria General Villegas.
- Bilzi, A.F. y Giolkosz, E.J. 1977. A Field Morphology Rating for Evaluating Pedological Development. *Soil Science* 124:45-48.
- Buol, S.W., Hole, F. D. y McCracken, R.J. 1989. Soil genesis and classification. Iowa State University Press, 446 p., Ames.
- Cabral, M. y Hurtado, M. A. 1990. Riesgo de inundación en el Área Sur de La Pampa Arenosa, Pcia. de Buenos Aires. I Simposio Latinoamericano sobre Riesgo Geológico Urbano: PAGINAS, Sao Paulo.
- Cabral, M., González, N., Giménez, J. E., Hernández, M. A. y Hurtado, M. A. 1996. Análisis geoambiental de la región semiárida del Noroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. VI Congreso Nacional y Conferencia Internacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio, Acta3: 345-364, Granada.
- Camilión, M.C. e Imbellone, P.A. 1984. Caracterización de los materiales constituyentes de algunos suelos del Partido de Carlos Tejedor. *Ciencia del suelo* 2(1): 137-148.
- Cappannini, D. y Domínguez, O. 1961. Los principales ambientes geodafológicos de la Provincia de Buenos Aires. *IDIA* 163: 33-39.
- Casas, R. y Pittaluga, A. 1990. Anegamiento y salinización de suelos en el noroeste de la provincia de Buenos Aires. Manejo de Tierras Anegadizas. FECIC, Centro para la Promoción de la Conservación del suelo y el agua – PROSA.
- Cumba, A eImbellone, P.A. 1998. Aplicaciones de un Índice de Desarrollo pedogenético a partir de descripciones de campo. V Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses: 10 p., Mar del Plata.
- Dillon, A.A., Hurtado, M.A., Jiménez, J. E. y Castillo, R.J. 1985. Consideraciones geomorfológicas y estratigráficas como base del carteo de suelos en un sector de la Pampa Arenosa (Pcia. de Buenos Aires). Jornadas Geológicas Bonaerenses, Actas: 737-749, Tandil.
- Dillon, A. y Castronovo, R. 1993. Inundaciones en zonas de llanura pampeana de la provincia de Buenos Aires, República Argentina. IV Encuentro de Geógrafos de América Latina: 4 p., Mérida.
- Díaz-Zorita, M., Duarte, G., Grove, J. 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil & Tillage Research* 65: 1-18.
- Díaz-Zorita, M y Davis, P. 1995. Cobertura vegetal y propiedades edáficas de pasturas perennes en la región noroeste bonaerense. *Revista Argentina de Producción animal* 15: 213-215.
- Dí Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., Gonzalez, L., Tablada, M. y Robledo, C. 2015. *Info Stat*. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba.
- Gerrard, J. 2000. *Fundamentals of soil*. Rutledge, p. 41, London.
- Hall, A., Rebella, C., Ghersa, C. y Culot, J. 1992. Field-crop systems of the Pampas. En: Pearson, C. (ed.), *Field Crop Ecosystems*. Elsevier, 413-450, Amsterdam.
- Hall, G.F. y Olson, C.G. 1991. Predicting variability of soils from landscape models. En: Mausbach M.J. y Wilding, L.P. (eds.), *Spatial variabilities of soils and landforms*. SSSA Special Publication 28: 9-24.
- Imbellone, P.A., Giménez, J.E. y Panigatti, J.L. 2010. Suelos de la Región Pampeana: Procesos de formación. Ed. INTA, 320 p., Buenos Aires.
- Imbellone, P. A. 2011. Classification of Paleosols. *São Paulo, UNESP, Geociências* 30(1): 5-13.
- Irigoin, J. 2011. Sistemas de evaluación de tierras y elaboración de modelos de aptitud de uso agrícola, para distintos escenarios climáticos, en un sector de la subregión Pampa Arenosa (Provincia de Buenos Aires, Argentina). Tesis de posgrado, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires (inédito), 1-160, Buenos Aires.
- Iriondo, M. 1990. Map of the South American plains-its present state. *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula* 6, 297-308.
- Kravchenko A. y Bullock D. 2000. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agron. J.* 92: 75-83.
- Latrubesse, E. y Ramonell, C., 2010. Landforms and chronology in the Pampean Sand Sea, Argentina. Abstracts Volume, 18 International Sedimentological Congress, Abstracts: 529, Mendoza.
- León, R.J.C., Burkart, S.E. y Movia, C.P. 1979. Relevamiento fitosociológico del pastizal del Norte de la Depresión de Salado (Pcia. de Buenos Aires). *La vegetación de la República Argentina. Serie Fitogeográfica* 17: 90.
- León, R.J.C., Rusch, G.M. y Oestergheld, M. 1984. Pastizales pampeanos-impacto agropecuario. *Phytocoenología* 12: 201-218.
- Malagnino, E.C. 1989. Paleoformas de origen eólico y sus relaciones con los modelos de inundación de la provincia de Buenos Aires. IV Simposio Latinoamericano de percepción remota y IX Reunión plenaria SELPER, Actas 2: 611-620, Bariloche.
- Malagnino, E. C. 1991. Late Pleistocene to Late Holocene Evolution of the Paleodesert of the Central Region of Argentina and its Paleoclimatic Implication. International Conference On Desert Landscapes. International Geological Correlation Programme. Project 252. Perth.
- Meixner, R.E y Singer, M.J. 1981. Use of a Field Morphology Rating System to Evaluate Soil Formation and Discontinuities. *Soil Science* 131: 114-123.
- Miaczynski, C.R.O. 1995. Los suelos hidromórficos e hidrohalomórficos de la provincia de

- Buenos Aires. Revista de la Facultad de Agronomía 15: 23-36.
- Moretti, L.M., Rodríguez, D.M., Navarro, M.F. y Bedendo, D.J. 2016. Metodología del relevamiento de suelos. Abordaje desde la perspectiva geológica. En: Pereyra, F.X. y Torres Duggan, M. (ed.), Suelos y Geología Argentina. Una visión integradora desde diferentes campos disciplinarios. UNDAV ediciones, 277-287, Buenos Aires.
- Moscatelli, G., 1991. Los Suelos de la Región Pampeana. En: Barsky, O. (ed.), El desarrollo Agropecuario pampeano. Grupo Editor Latinoamericano, 11-75, Buenos Aires.
- Pereyra, F.X. 2016. Relaciones geomorfología-suelos en Argentina. En: Pereyra, F.X. y Torres Duggan, M. (ed.), Suelos y Geología Argentina. Una visión integradora desde diferentes campos disciplinarios. UNDAV ediciones, 277-287. Buenos Aires.
- Pouquet, J. 1966. Initiation géopédologique. Les sols et la geographic. Société d'édition d'enseignement supérieur, 269 p., Paris.
- SAGPYA-INTA. 1974 – 1997. Colección: Cartas de Suelos de la República Argentina. Escala 1:50.000. INTA, Buenos Aires. <http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/>
- SAGYP-INTA. 1989. Mapa de suelos de la Provincia de Buenos Aires. Proyecto PNUD/ARG/85/019. ISBN 950-9853-17-8.
- Rawls, W., Brakensiek, D. y Saxton, K. 1982. Estimation of soil water properties. Trans. ASAE 25:1316-1320.
- Sierra E.M., Hurtado R. y Spescha, L. 1993. Corrimiento de las isoyetas anuales medias decenales en la región pampeana, 1941-1990. Revista de la Facultad de Agronomía 14 (2):139-144.
- Soil Survey Staff 2010. Keys to Soil Taxonomy, 11 th ed. USDA. Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Soriano, A. 1992. Río de la Plata grassland. En: Coupland, R.T. (ed.), Natural grassland: introduction and western hemisphere. Elsevier, Ecosystem of the World 8ª, 367-407, Amsterdam.
- Viglizzo, E.F. y Frank, F.C. 2006. Ecological interactions, feedbacks, thresholds and collapses in the Argentine Pampas in response to climate and farming during the last century. Quaternary International 158: 122-126.
- Wilding, L. P. y Drees, L. R. 1983. Spatial variability and pedology. En: Wilding, L.P., Smek, N.E. y Hall, G.F. (eds.), Pedogenesis and soil taxonomy. Elsevier, I. Concepts and interactions, 83-116, Amsterdam.
- Yang, L., Wylie, B.K., Tieszen, L.L. y Reed, B.C. 1998. An analysis of relationships among climate forcing and time-integrated NDVI of grasslands over the U.S. northern and central Great Plains. Remote Sensing of Environment 65: 25-37.
- Young, F. y Hammer, R. 2000. Defining geographic soil bodies by landscape position, soil taxonomy and cluster analysis. Soil Science Society of America Journal 64: 989-998.
- Zinck, J.A. 1988. Physiography and soils. Lecture notes. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), 1-41, Enschede.
- Zinck, A 2012. Geopedología. Elementos de geomorfología para el estudio de suelos y de riesgos naturales. ITC Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, 1-127, Enschede.

Recibido: 8 de octubre, 2016

Aceptado: 3 de febrero, 2017