

Compacidad de los suelos desarrollados sobre sedimentos Terciario-Cuaternarios en Terra Cha (Lugo)

Compacity of soils developed over Tertiary-Quaternary sediments in the Terra Cha area (Lugo)

PAZ GONZÁLEZ, A.; NEIRA SEIJO, X.; BENITO RUEDA, E.

Using a gamma probe, bulk density has been measured for nine profiles from 20 cm depth to depths ranging from 90 to 150 cm. The intent of this work was to assess total porosity variability within and between sites at an area characterized by an abrupt textural change.

Bulk density values obtained at both tertiary and quaternary subsoil layers are significantly higher and show less variability between sites and also more repeatability along the time than bulk density values obtained at the surface A and B soil horizons. In addition, Hg intrusion porosimetry demonstrated a decrease of the average pore diameter with depth and thus with age of the soil and sediment materials.

Key words: compacity, bulk density, total porosity, Hg intrusion porosimetry, gamma probe

PAZ GONZÁLEZ, A. (Facultad de Ciencias. Universidad de La Coruña). NEIRA SEIJO, X. y BENITO RUEDA, E. (E.P.S. de Lugo. Universidad de Santiago de Compostela)

INTRODUCCIÓN

La presencia de horizontes compactos en el suelo o el subsuelo puede tener diverso origen. Han sido citadas con frecuencia suelas de labor compactas de origen antropogénico (MONNIER & GOSS, 1987; HÅKANSSON et al., 1988; CHAMEN et al., 1992) y horizontes o niveles subyacentes endurecidos por procesos geológicos y edafogénicos naturales (SAINI, 1980; JONES, 1983).

En la cuenca de Terra Chá (Lugo), junto a una zona de esquistos precámbricos, el material de partida más abundante está constituido por sedimentos terciario-cuaternarios. Se trata de sedimentos miopliocénicos en cuyo techo se aprecian capas alternantes de materiales arcillosos y arenosos, frecuentemente recubiertos por un manto cuaternario más o menos espeso (CASTELAO & DÍAZ-FIERROS, 1992). Los suelos desarrollados sobre estos materiales presentan cambios texturales abruptos, particularmente cuando los sedimentos terciarios arcillosos suceden dentro del perfil a los niveles cuaternarios, en los que las gravas son muy abundantes.

La evolución del suelo se ve frecuentemente condicionada por la presencia de un nivel freático próximo a la superficie. Por otra parte, las observaciones morfológicas y los análisis de las propiedades físicas han permitido reconocer el elevado grado de compactación natural de algunos niveles del subsuelo, que frecuentemente presentan signos de edafogénesis antigua, como son los sedimentos arenosos cementados y, sobre todo, las arcillas terciarias.

La conductividad hidráulica, un índice utilizado con frecuencia en los estudios de compactación, de acuerdo con algunos datos disponibles para Terra Chá, es moderada en

las capas arenosas y lenta a muy lenta en las arcillosas (DÍAZ-FIERROS & GUITIÁN, 1968; CASTELAO & DÍAZ-FIERROS, 1992; PAZ & NEIRA, 1994).

La distribución del tamaño de poro y la densidad aparente en agregados centimétricos (BENITO et al, 1992, 1993) fueron también objeto de estudio. Estas determinaciones pusieron de manifiesto la escasa porosidad total a la escala de medida empleada y la elevada densidad en el subsuelo arcillo-arenoso y arcilloso, en comparación con el horizonte Ap, arenoso.

La presencia de abundantes gravas en los niveles cuaternarios superficiales, dificulta la medida «in situ» de propiedades mecánicas relacionadas con la compactación, como la resistencia a la penetración, mediante las técnicas habituales. Por contra, la instalación de tubos de acceso para la evaluación del balance hídrico, con un equipo que consta de humidímetro de neutrones y densímetro gamma, permitió obtener datos de densidad aparente, propiedad que se ha usado con frecuencia para evaluar la porosidad total y a partir de ésta estimar el grado de compactación.

Son numerosos los métodos de medida de la densidad aparente en el campo, pudiendo agruparse en directos o convencionales e indirectos, que están basados en la interacción de la radiación gamma con el suelo. Los métodos directos (cilindros de volumen conocido, densitómetro de membrana, hoyo relleno de arena, etc) son destructivos y pueden aplicarse a una amplia gama de volúmenes. Los métodos radiactivos, presentan la ventaja de que, una vez instalado el tubo de acceso por el que se desliza el sensor, permiten efectuar grandes series de medidas con el mismo centro de referencia, aunque no siempre afecten al mismo volumen.

Conviene distinguir entre densímetros de transmisión y de retrodifusión. La elevada resolución espacial de la gammimetría de transmisión, que se logra utilizando haces de rayos colimados (VANBAVEL, 1959), ha permitido estudiar la compacidad de las capas superficiales (SOANE et al., 1986; SMITH, 1987; SMITH & DICKSON, 1990). Por contra, la gammimetría de retrodifusión presenta mayor radio de acción y menor resolución; otra desventaja estriba en que la esfera de influencia varía con el contenido hídrico (FREITAG, 1971; ERBACH, 1987). Se han diseñado equipos para medir la densidad por retrodifusión desde la superficie y en profundidad, a favor de un tubo de acceso. Los resultados que proporcionan estas sondas pueden ser tan satisfactorios como los obtenidos con la doble sonda gamma (CULLEY & MC GOVERN, 1990).

En este trabajo se analizan nueve perfiles de densidad aparente medidos por gammimetría de retrodifusión en una explotación agrícola de Terra Chá, en los que la profundidad mínima de las medidas estaba centrada a 20 cm de la superficie y la máxima osciló de 90 a 150 cm. Los objetivos son: a) determinar perfiles de densidad en un suelo representativo del área estudiada para comparar la compacidad del horizonte superficial con la de los profundos y los materiales sedimentarios subyacentes, b) contribuir a la caracterización de la variabilidad espacial y evaluar la indeterminación inherente a este método de medida.

MATERIAL Y MÉTODOS

Los datos para este estudio se tomaron en 9 tubos de acceso que estaban emplazados en la granja Gayoso-Castro de Castro de Ribeira

de Lea (Lugo) en parcelas con distintas características y dedicación, los cuales se utilizaron para medir la evolución de la reserva hídrica en experiencias llevadas a cabo entre 1989 y 1992. La descripción detallada del perfil del suelo y de la dedicación en el entorno de cada tubo de acceso, así como de la duración del período de medida, se ha llevado a cabo anteriormente (NEIRA SEIJO, 1994).

Las análisis generales del suelo se llevaron a cabo según los métodos descritos en GUITIÁN & CARBALLAS (1976); en la Tabl. I se consiga un resumen de los resultados obtenidos. La textura de la tierra fina es franco-arenosa en el horizonte Ap, franco-arcillo-arenosa o franco-arenosa en los Bw y BC y arcillosa en el 2Btg; la discontinuidad textural entre los niveles cuaternarios (horizontes Ap, Bw y BC) y terciarios (horizonte 2Btg) resulta si cabe más patente al considerar el contenido en gravas. Contrasta, asimismo, el contenido en materia orgánica del horizonte Ap (> 8,5% en todas las parcelas) con el de los horizontes inferiores (< 1,5 %).

El suelo, de perfil Ap-Bw-BC o Ap-Bw-2Btg, se ha clasificado, según los criterios de la FAO (1990) y FAO-ISRIC (1994) como Cambisol gleico.

La densidad aparente en húmedo y el contenido hídrico se midieron con una sonda Campbell Pacific Nuclear, modelo 501 B, que consta de densímetro gamma y humidímetro de neutrones. La fuente de rayos gamma consiste en 10 mCi de ^{137}Cs y la fuente de neutrones está constituida por 50 mCi de $^{241}\text{Am-Be}$, siendo el detector BF_3 . El diámetro de la sonda es de 38,1 mm. Una particularidad del modelo empleado estriba en que el centro de la esfera de influencia para la medida de humedad está situado

TABLA I. Altitud y datos analíticos del perfil en las parcelas en que se instalaron tubos de acceso para densímetro gamma.

Tubo n°	Altitud (m)	Horiz.	Prof. (cm)	Carbono (%)	Análisis mecánico			
					A	L	Ar	Gravas
1	414,5	Ap	0-35	5,47	58,5	21,7	19,8	31,0
		Bw	35-70	0,49	48,8	15,1	36,1	42,3
		2Btg	> 70	0,42	26,8	32,4	40,8	-
2	415,5	Ap	0-35	5,05	63,4	19,1	17,5	37,0
		Bw	35-70	0,72	59,1	20,7	19,2	44,8
		2Btg	> 70	0,26	24,1	28,0	47,9	-
3	424,5	Ap	0-35	5,78	55,4	26,1	18,5	21,3
		Bw	35-80	0,35	49,7	19,6	30,7	47,9
		BC	80-150	0,16	46,1	21,4	32,5	41
		2Btg	>150	0,58	23,0	30,2	46,8	-
4 a 7	427,5	Ap	0-30	5,45	59,1	22,9	18,0	9,1
		Bw	30-60	1,31	65,7	4,9	29,4	24,2
		BC	>60	0,88	51,7	16,2	32,1	41,3
8 y 9	413,5	Ap	0-30	5,30	71,9	9,4	18,7	39,8
		Bw	30-50	1,13	67,3	8,9	23,8	61,9
		BC	50-60	0,89	76,0	6,3	17,7	66,3
		2Btg	> 60	1,20	25,3	12,9	61,8	-

22 cm por encima del de densidad. Las determinaciones se efectuaban desde 20 cm hasta una profundidad máxima que oscilaba entre 90 y 150 cm, con un intervalo de 10 cm entre cada una.

El calibrado de la sonda se efectuó en tubos de duraluminio comercial de 40 x 45 mm, de las mismas características que los instalados. El humidímetro se calibró frente al contenido hídrico determinado

por gravimetría en el suelo objeto de estudio; el densímetro se calibró a partir de materiales patrón de densidad conocida (PAZ et al., 1994).

La densidad aparente, d_a , referida a suelo seco, se obtuvo a partir de la densidad aparente en húmedo, d'_a , y el contenido volumétrico en agua, θ , según la expresión:

$$d_a = d'_a + \mu\theta \quad (1)$$

En donde μ , es una constante de corrección de la densidad húmeda medida por retrodifusión de rayos gamma. Esta constante da cuenta de la diferencia en cuanto al coeficiente de atenuación de la radiación gamma entre el agua ($0,0776 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) y el suelo ($0,0856 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$), por lo que $\mu = 1.113$.

La densidad real, d_r , se determinó por picnometría; en cada horizonte se llevaron a cabo determinaciones por triplicado. La porosidad total, n , se calculó a partir de las densidades real y aparente mediante la expresión :

$$n = (d_r - d_a)/d_r \quad (2)$$

La densidad real se determinó por picnometría. La distribución del tamaño de poro en agregados se midió por intrusión de mercurio, mediante un porosímetro Carlo Erba, serie 2000 (BENITO et al., 1992) que opera desde 0,006 hasta 100 μm .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los lugares en que se instalaron tubos de acceso se sitúan sobre terrazas cuaternarias que pertenecen al segundo (+ 20-25) y tercer nivel (+ 7-9) (CASTELAO & DÍAZ-FIERROS, 1992). Los abundantes cantos rodados de las terrazas tienen un diámetro de 3 a 8 cm; en el horizonte de laboreo se presentan individualizados y por debajo de éste están incluidos en una matriz limo-arenosa o arcillo-arenosa. Los materiales miocénicos que se encuentran debajo del nivel cuaternario presenta una permeabilidad muy baja, por lo que se considera como el factor básico que controla las características hidrodinámicas de la cuenca.

En la Fig. 1 se presentan los datos de densidad aparente medidos a tres profundidades, 20, 50 y 90 cm, de tal modo que los valores obtenidos en los distintos tubos de acceso están ordenados de menor a mayor. En la misma figura se representa el error estándar de cada valor medio.

Se aprecia, en primer lugar, como los valores medios de densidad aparente de los nueve tubos de acceso aumentan con la profundidad, de modo que 20 cm se cifran en $1,08 \text{ g/cm}^3$, a 50 cm en $1,22 \text{ g/cm}^3$ y a 90 cm en $1,75 \text{ g/cm}^3$. Considerando tubos individuales, la densidad aparente a 20 cm fluctúa entre 0,97 y $1,29 \text{ g/cm}^3$, a 50 cm entre 0,96 y $1,46 \text{ g/cm}^3$ y a 90 cm entre 1,51 y $1,94 \text{ g/cm}^3$.

De estos resultados se infiere, en primer lugar, que las fluctuaciones en el espacio de la densidad aparente para una profundidad dada no son desproporcionadamente altas, ni siquiera cuando, como ocurre a 90 cm, el centro de la esfera de influencia de algunos de los tubos de acceso se encuentra en niveles terciarios (tubos 1, 2, 8 y 9) y el de los restantes en niveles cuaternarios (tubos 3, 4, 5, 6, y 7).

El patrón de evolución de los valores de densidad aparente en profundidad puede observarse también en la Fig 2, en la que se presentan a título de ejemplo los valores medios y el error estándar obtenidos en cuatro perfiles. En dos de estos perfiles (n° 3 y 6) los datos corresponden exclusivamente a materiales cuaternarios; por el contrario en el perfil n° 1 el terciario se encuentra a 70 cm y en el n° 8 a 60 cm, por lo que el tubo de acceso atraviesa materiales terciarios y cuaternarios y, por lo tanto, niveles que son más heterogéneos desde el punto de vista textural.

Las Figs. 1 y 2 ponen de manifiesto que, contrariamente a lo que ocurre con la varia-

bilidad espacial, la densidad aparente entre horizontes superficiales y horizontes o niveles sedimentarios subsuperficiales presenta marcadas diferencias, de modo que en la mayor parte de los perfiles se aprecia que tiende a ocurrir un brusco incremento entre los valores medidos cuando la sonda está centrada a 50 y a 70-80 cm de profundidad.

Conviene remarcar, en todo caso, que por debajo de 70 cm los valores de densidad aparente obtenidos están comprendidos entre 1,6 y 2 g/cm³, excepto en el tubo 3 en el que se aprecian niveles menos densos a estas profundidades, aunque la diferencia entre los horizontes superficiales y los del subsuelo también es importante. Estos resultados parecen ser independientes del tipo de material que se encuentre en profundidad. Densidades tan altas corresponden a formaciones con un elevado grado de compacidad natural; de acuerdo con los datos bibliográficos (SAINI, 1990; JONES, 1983) pueden presentarse en capas u horizontes de origen muy diverso, como son las formaciones de till, el fragipan o el ortstein. En el área estudiada los niveles de densidad aparente superior a 1,6 g/cm³, a profundidades mayores de 70 cm, se presentan tanto sobre materiales cuaternarios como terciarios, cuyos componentes han estado sometidos a procesos de cementación química; esta apreciación también es válida para los lentejones de material más denso con valores de 1,8 a 2 g/cm³, como se puede apreciar en los tubos 2 y 8 para el terciario y en los tubos 4, 5, 6 y 7 para el cuaternario. En coherencia con los valores de densidad aparente presentados en este trabajo, han sido previamente puestos de manifiesto los principales procesos que deben de haber contribuido a la cementación, como son la iluviación de arcillas en los horizontes fosi-

lizados del terciario y la rubefacción en algunos materiales cuaternarios (CASTELAO & DÍAZ-FIERROS, 1992).

Las capas densas del subsuelo no estarían afectados por el ciclo actual de edafogénesis, una de cuyas características más notables es la tendencia al escaso desarrollo del perfil en profundidad; esta limitación de la evolución del perfil parece debida a la ralentización de los procesos de formación del suelo como consecuencia de la hidromorfía (CASTELAO & DÍAZ-FIERROS, 1992).

Por otra parte, el elevado gradiente de los perfiles de densidad aparente que se aprecia, sobre todo entre 50 y 70 cm, puede reflejar discontinuidades de composición o texturales situadas tanto por encima como por debajo de este nivel; así, aunque el límite morfológico del horizonte Ap, arenoso y rico en materia orgánica, y el mineral subyacente está situado en general entre 30 y 35 cm, las diferencias de densidad entre ambos horizontes sólo serán perceptibles a partir de medidas cuyo centro se sitúe a más profundidad, ya que el radio mayor del esferoide de influencia del equipo empleado es del orden de 20 a 35 cm. Además, es necesario considerar que el laboreo profundo actual y la subsiguiente mezcla del horizonte rico en materia orgánica con los minerales subyacentes es uno de los factores que determinan la oscilación de densidad aparente en los niveles próximos a la superficie más importante, de tal modo que este factor puede afectar a los valores medidos hasta 70 cm de profundidad.

La información que las Figs 1 y 2 contienen acerca de la dispersión de la densidad aparente permite ya un análisis de la variabilidad temporal de la medida; por otra parte en la Tabla II se presentan los parámetros estadísticos de posición (media) y de

TABLA II. Datos estadísticos de la porosidad, \bar{x} = media; std = desv. estándar y c.v. = coeficiente de variación. Prof. es la profundidad en cm. n es el n.º de muestras.

Prof.	\bar{x}	s.t.d.	c.v.	\bar{x}	s.t.d.	c.v.	\bar{x}	s.t.d.	c.v.
	Tubo 1			Tubo 2			Tubo 3		
20	62,2	3,8	6,1	60,7	4,6	7,6	59,4	3,1	5,2
30	53,6	5,1	9,5	43,2	7,4	17,1	60,9	3,3	5,4
40	46,9	2,5	5,3	42,7	2,6	6,1	56,2	3,0	5,4
50	50,2	1,7	3,5	45,0	3,4	7,5	62,5	1,9	3,1
60	44,9	2,2	4,9	40,4	2,3	5,8	63,2	5,4	8,6
70	40,5	0,9	2,2	39,1	3,2	8,2	53,2	5,9	11,2
80	39,7	0,7	1,8	34,6	2,1	6,1	42,4	1,7	4,0
90	36,2	0,8	2,0	33,1	0,9	2,7	43,3	2,6	6,0
100	36,4	0,9	2,6	33,5	1,0	3,1	39,2	0,9	2,2
110	36,4	0,9	2,4	32,4	0,9	2,8	45,1	2,5	5,6
120	37,8	0,7	1,9	30,7	1,4	4,5	49,7	1,	3,7
130	38,1	0,8	2,2	30,2	0,6	1,9	50,2	2,6	5,1
140	38,5	0,6	1,5	30,5	1,0	3,4	40,3	3,5	8,6
150	38,6	0,7	1,7	29,0	0,8	2,7	34,1	2,5	7,3
	(n = 35)			(n = 32)			(n = 34)		
	Tubo 4			Tubo 5			Tubo 6		
20	61,6	6,7	10,8	55,6	4,0	7,2	55,6	5,4	9,8
30	53,3	5,0	9,3	52,1	4,7	9,1	51,9	8,7	16,8
40	61,4	3,6	5,9	61,4	4,6	7,5	65,0	2,8	4,2
50	54,2	3,5	6,4	53,3	5,8	10,9	65,2	4,0	6,1
60	42,8	3,2	7,4	35,4	3,7	10,4	65,2	4,0	6,1
70	36,9	1,1	3,1	28,2	1,3	4,7	48,8	5,0	10,3
80	34,3	1,3	3,7	26,1	1,0	3,8	36,1	2,3	6,4
90	33,1	1,0	2,9	27,1	1,1	4,1	30,1	1,6	5,4
100	31,1	1,3	4,3	28,4	1,1	3,7	29,8	1,9	6,4
110	27,9	1,0	3,5	28,4	1,0	3,0	35,8	2,1	6,0
120	28,4	1,7	6,1	-	-	-	37,6	2,5	6,5
130	-	-	-	-	-	-	37,9	3,0	8,0
	(n=36; a 20 cm n=28)			(n=40; a 20 cm, n=33; a 30 cm, n=39)			(n=41; a 20 cm, n=29)		
	Tubo 7			Tubo 8			Tubo 9		
20	57,8	4,2	7,2	48,7	4,5	9,2	52,7	2,1	3,9
30	56,0	7,8	13,9	39,2	3,8	9,6	48,3	3,4	7,0
40	68,5	3,6	5,3	49,4	2,9	5,8	54,0	3,1	5,8
50	59,3	5,4	9,1	45,6	3,3	7,2	46,6	3,1	6,6
60	44,8	3,3	7,3	38,9	3,0	7,8	35,2	2,0	5,7
70	39,0	1,0	2,5	30,5	2,1	7,0	30,9	1,0	3,3
80	36,6	1,4	3,9	34,5	1,6	4,5	29,9	1,0	3,3
90	37,6	1,0	2,6	35,0	1,0	2,9	32,3	1,2	3,8
100	36,5	1,1	3,1	40,3	1,5	3,8	-	-	-
110	33,1	0,7	2,2	42,3	1,2	2,8	-	-	-
120	25,8	1,7	6,6	39,0	1,2	3,0	-	-	-
130	-	-	-	35,3	1,3	3,0	-	-	-
	(n=45; a 20 cm, n=46)			(n=11)			(n=12)		

dispersión (desviación estándar y coeficiente de variación) de la porosidad total, calculada con la expresión (2), que son similares a los de densidad aparente. Estos resultados ponen de manifiesto que la variabilidad temporal de la densidad aparente en el conjunto de los nueve tubos es más importante en los horizontes superficiales. Así, se observa que entre 20 y 70 cm, niveles a los que pudo afectar el laboreo del suelo, los coeficientes de variación de porosidad total oscilan entre 2,5 y 17,1 %, mientras que a partir de 80 cm lo hacen entre 1,8 y 8,6 %.

Es remarcable que se aprecie menor variabilidad temporal de la medida en los niveles terciarios subsuperficiales que en los cuaternarios. Esto pone de manifiesto que puede existir una relación entre la dificultad para la instalación de los tubos de acceso, que debido a la pedregosidad es mucho más importante en las capas cuaternarias, y la repetibilidad de la medida a lo largo del tiempo.

Admitiendo que la densidad aparente y la porosidad son variables que presentan una distribución normal, el número de medidas necesario para conocer su valor medio con un error relativo y una probabilidad previamente establecidos, se puede obtener mediante la expresión :

$$N = \frac{t_{1-\alpha/2}^2 CV^2}{dr^2} \quad (3)$$

En donde, N, es el número de muestras a tomar, t, la variable de Student que corresponde a una probabilidad de $1-\alpha$, CV, el coeficiente de variación y dr, el error relativo.

Si se admite un error relativo máximo del 5%, y para un nivel de precisión del 95% el número de determinaciones a efectuar es

de 2 cuando el CV vale 1 %, 12 para un CV de 8 % y 42 para un CV de 16%.

Por otra parte, si se tiene en cuenta la dispersión con respecto a los valores medios de las determinaciones repetidas a lo largo del tiempo en cada tubo de acceso, se aprecia que por debajo de 70 cm el máximo coeficiente de variación obtenido vale 8,6 %; de hecho, con frecuencia los coeficientes de variación en los materiales del subsuelo son inferiores al 4 %, y algunas veces, en particular cuando la medida afecta a niveles miocénicos (tubos 1, 2 y 8), incluso inferiores al 2%. Por lo tanto, excepto en los casos más desfavorables, 8 determinaciones en diferentes períodos del año son suficientes para obtener valores medios de densidad aparente con errores relativos inferiores al 5 % y un nivel de precisión superior al 95 % de probabilidad en los niveles del subsuelo en los que ya no se aprecia la influencia del laboreo. En los horizontes superficiales la densidad aparente oscila a lo largo del tiempo en respuesta, entre otras, a acciones antropogénicas y climáticas, por lo que la precisión de los valores medios es menor; no obstante el orden de magnitud de la dispersión autoriza su utilización para comparar la compacidad de estos horizontes con los niveles del subsuelo.

La buena repetibilidad de las determinaciones a lo largo del tiempo en el subsuelo es un índice de la escasa importancia que tienen los procesos capaces de inducir una fluctuación estacional del volumen del perfil, como pueden ser los procesos de hinchamiento y contracción, incluso en los niveles mas arcillosos. Estos resultados están de acuerdo con los análisis mineralógicos, según los cuales en el conjunto del perfil predomina la caolinita, y, si bien en algunos niveles se detectan mayor o menor abun-

dancia de illitas, las esmectitas están ausentes en cantidades importantes (CASTELAO & DÍAZ-FIERROS, 1992).

Cuando se considera el conjunto de los tubos de acceso, los coeficientes de variación de las medidas efectuadas a la misma profundidad en los niveles en que el laboreo no afecta a la determinación, oscilaron entre 5,5 % y 12,5 %. De aquí se infiere que para caracterizar la variabilidad de la densidad aparente y la porosidad total en el subsuelo se necesita un mayor número de muestras que el requerido para el análisis de la repetibilidad en el tiempo.

Un número de determinaciones del orden de 30 a 40 sería difícilmente justificable solamente para aumentar la precisión de la medida. Sin embargo el esfuerzo que supondría la intensificación de las determinaciones podría permitir el análisis de la autocorrelación y, en su caso, describir el patrón de variabilidad espacial de la densidad aparente, mediante los métodos geostatísticos.

En relación con los datos medios de porosidad total (Tab. II), se observa que los valores obtenidos hasta que el centro de la esfera de influencia alcanzar los 50 cm de profundidad son muy elevados, siempre mayores del 42 % del volumen del suelo y con frecuencia superiores al 50 %, como corresponde a horizontes de textura arenosa y ricos en materia orgánica. Por contra, a partir de 80 cm se encuentran en 6 de los 9 perfiles estudiados niveles más o menos potentes con porosidades bajas, comprendidas entre la mínima observada, 25,8 %, y 30 % y solo en dos perfiles (nº 3 y 8) se observa algún nivel con porosidad total mayor del 40 %. Estos datos ponen en evidencia que los procesos edáficos actuales han originado un incremento de la porosi-

dad total y, por otro lado, que los niveles sedimentarios y horizontes enterrados del subsuelo son relativamente homogéneos en cuanto a la porosidad total, como también se puso ya de manifiesto para la densidad aparente.

HARTGE & HORN (1991) consideran que la compactación de un material es muy importante cuando su porosidad total es menor de un 38 %. Por lo tanto, se puede concluir que el subsuelo de los perfiles estudiados presenta un elevado grado de compactación natural, que probablemente es la consecuencia de antiguos procesos de iluviación y rubefacción.

Si la porosidad total es un índice de la compactación de un horizonte, del tamaño de los poros depende la retención y el transporte de aire, agua y solutos. Así, un material con un 25 % de porosidad total puede presentar valores de permeabilidad muy diferentes, según la proporción de las diferentes clases de poros.

A partir de los datos de porosidad total y reserva hídrica, se pudo determinar por balance que la porosidad de aireación se mantiene prácticamente constante por debajo de 100 cm, cuando están presentes niveles miocénicos (NEIRA SEIJO, 1994), lo que indirectamente pone en evidencia la importancia de la microporosidad de los materiales terciarios.

Las determinaciones directas de distribución de tamaño de poro efectuadas por porosimetría de intrusión de Hg aportan más información. En la Tab. III se presentan datos de volumen total y en tres intervalos de tamaño de poro, diámetro equivalente medio y densidad aparente medidos en agregados, a escala centimétrica. Las clases de tamaño se eligieron de acuerdo con los criterios clásicos, teniendo en cuenta las

funciones de los poros de distinto diámetro; los macroporos o poros de transmisión (100-50 μm) son responsables del drenaje por gravedad, los mesoporos o poros de almacenamiento (50-0,5 μm) acumulan el agua útil para la vegetación y los microporos o poros residuales (< 0,5 μm) retienen el agua que no circula o lo hace a velocidad muy lenta para que tenga importancia edáfica.

En la Tab III se aprecia en primer lugar que los datos de densidad aparente medidos a escala centimétrica permiten evaluar la compacidad de los agregados y confirman el carácter masivo de los materiales presentes en los horizontes minerales.

Se observa, asimismo, que el volumen total de Hg inyectado es más elevado en el horizonte Ap que en los horizontes inferiores, resultado coherente con las diferencias de porosidad medidas «in situ» por gammimetría.

Además, la porosimetría de intrusión de Hg pone en evidencia, por una parte, una drástica reducción de la porosidad de almacenamiento (50-0,5 μm) y, por otra, un

importante incremento paralelo de la porosidad residual de las muestras procedentes de los horizontes Bw y 2Btg, cuando se comparan con las del horizonte Ap superficial. También se comprueba que el diámetro medio de poro disminuye de acuerdo con la secuencia Ap > Bw > 2Btg.

Finalmente, comparando los datos de densidad aparente y porosidad medidos a las dos escalas, queda en evidencia el escaso desarrollo de los macroporos formados a favor de huecos del tipo grietas de retracción, fisuras o canales en los horizontes subsuperficiales. En consecuencia las características del sistema poroso de los materiales del subsuelo favorecerá la presencia de fenómenos de gleificación y/o pseudogleificación.

CONCLUSIONES

Las medidas de densidad aparente por gammimetría de retrodifusión ponen en evidencia la presencia de niveles compactos, de modo que a profundidades mayores de 70 cm los valores alcanzados son con fre-

TABLA III. Porosidad total, volumen de diferentes fracciones de poros y diámetro medio equivalente en muestras de 2-3 cm^3

Horizonte	Porosidad (cm^3/cm^3)				Diámetro equiv. (μm)	Densidad aparente (g/cm^3)
	TOTAL	100-50 (μm)	50-0,5 (μm)	<0,5 (μm)		
Ap (1)	43,55	2,97	34,02	6,56	29,17	1,303
Ap (2)	37,66	2,83	29,17	5,66	3,08	1,404
Bw (1)	20,81	0,55	10,68	9,58	0,39	2,018
2Btg (2)	28,62	0,70	11,38	16,54	0,10	1,785

(1) Perfil n° 1; (2) Perfil n° 2

cuencia superiores a $1,6 \text{ g/cm}^3$, tanto en los niveles cuaternarios pedregosos como en los terciarios arcillosos.

En los perfiles estudiados, el ciclo de edafogénesis actual origina suelos con un horizonte orgánico cuya porosidad total es elevada y con una porosidad de transmisión y almacenamiento bien desarrollada.

Los materiales sedimentarios subyacentes al suelo actual y los horizontes enterrados, tanto de origen terciario como cuaternario, presentan un elevado grado de compacidad y una porosidad total muy infe-

rior a la de los horizontes superiores. A escala centimétrica se pudo observar el desarrollo de una porosidad residual importante en los horizontes Bw y 2Btg, mientras que la porosidad de transmisión y almacenamiento de éstos es inferior a la del horizonte Ap.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se llevó a cabo, en parte, en el marco del proyecto XUGA 27101b91 de la Xunta de Galicia

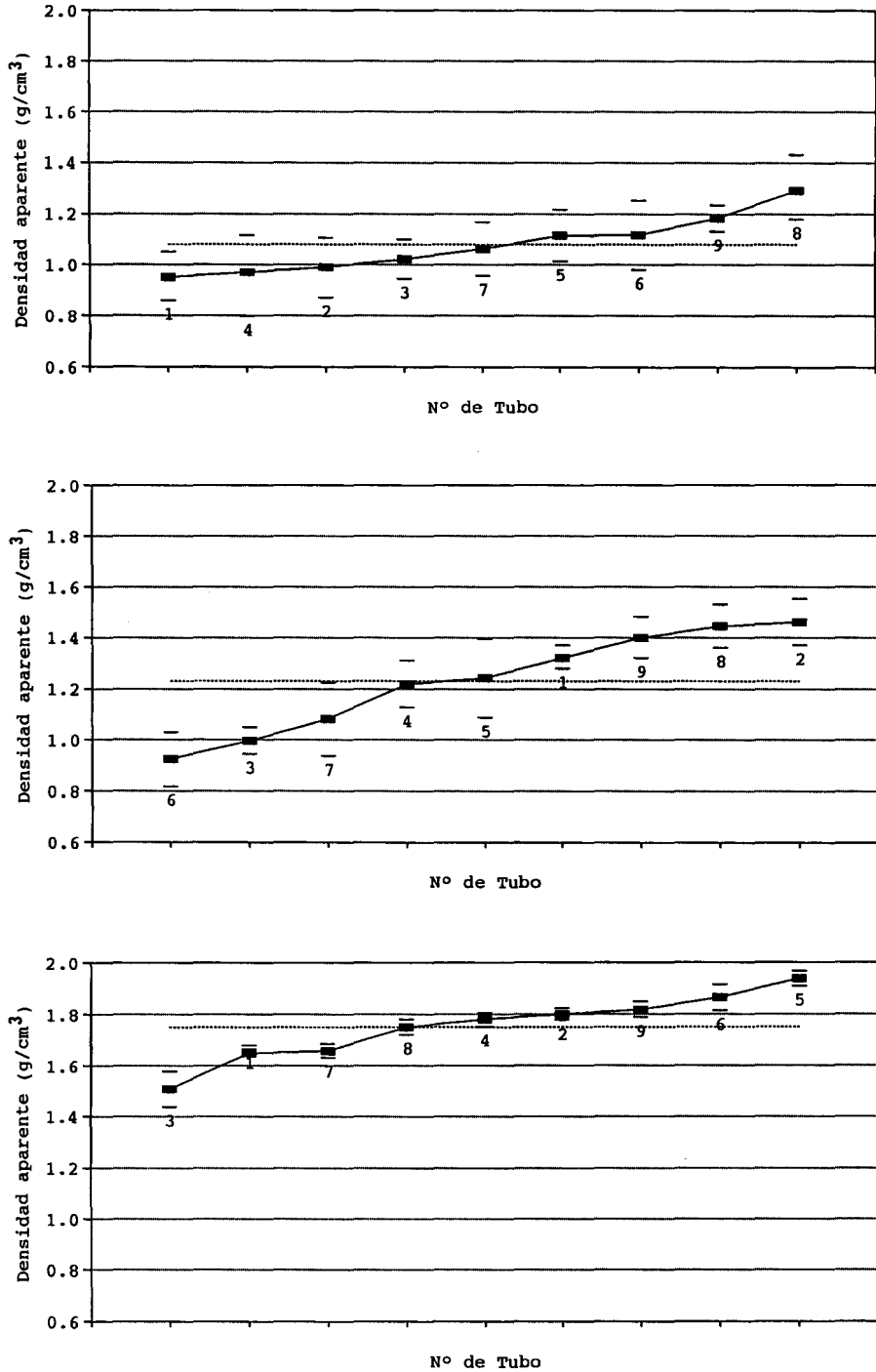


Fig. 1. Densidad aparente media (■) y desviación estándar de la misma (—) a 20, 50 y 90 cm ordenada de menor a mayor en diferentes tubos de acceso.

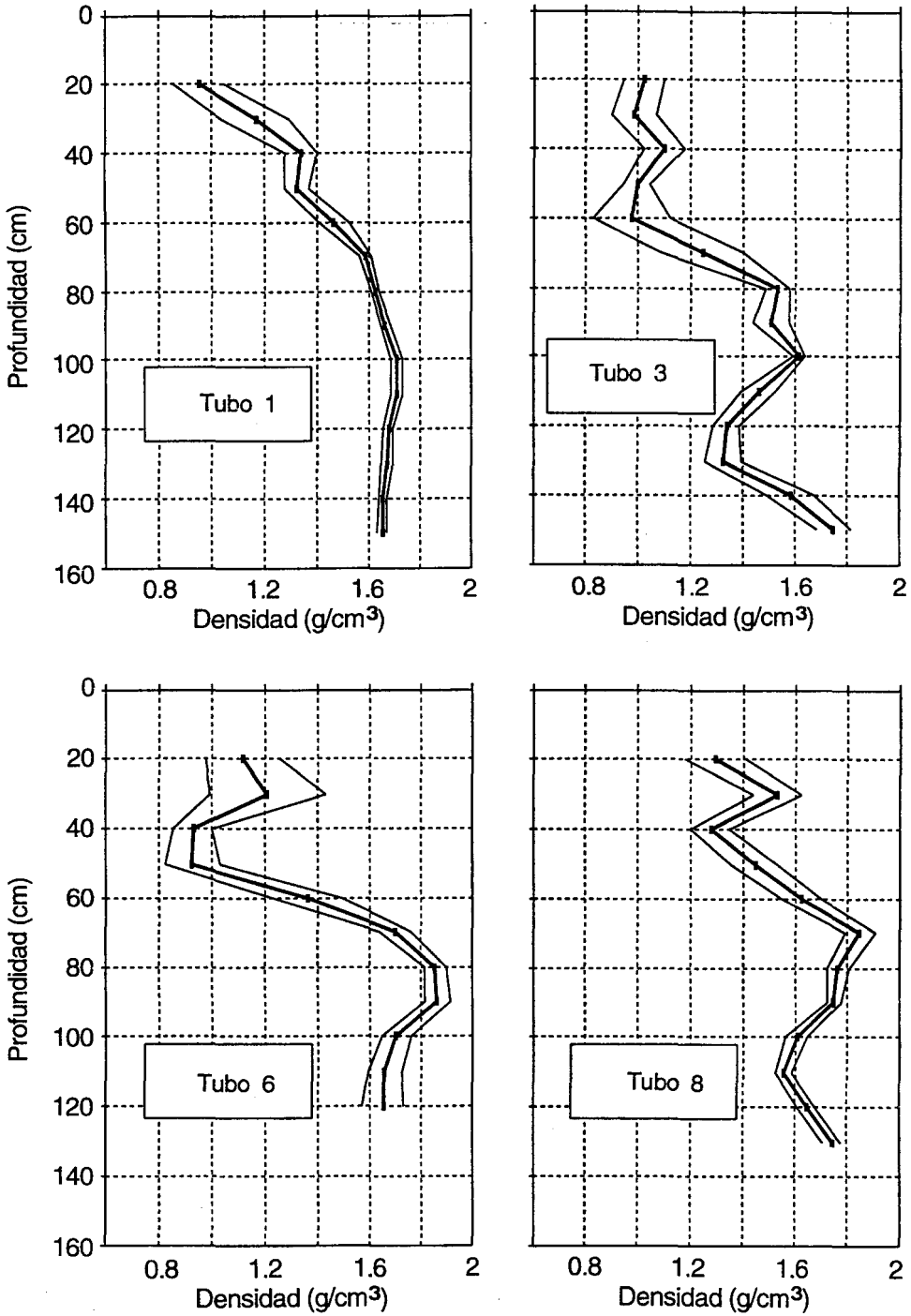


Fig. 2. Ejemplos de perfiles de datos medios de densidad aparente (■) y desviación estándar de los mismos (—).

BIBLIOGRAFÍA

- BENITO, E., PAZ, A. & PINI, R. (1992). Aplicación de la técnica de porosimetría por intrusión de mercurio en el estudio de la porosidad de un conjunto de suelos del NW de España. *Suelo y Planta*, 1 : 28-42.
- BENITO, E., PINI, R., VIGNA GUIDI, G. & SCOTTO, A. (1993). Porosity characterization in two spanish soil profiles with hydromorphic features. *Agrochimica*, 38 : 37-43.
- CASTELAO GEGUNDE, A. & DIAZ-FIERROS, F. (1992). *Os solos de Terra Chá. Tipos. Xénese e aproveitamento*. Publ. Diputación Provincial de Lugo. 166 pp.
- CHAMEN, W. C. T., VERMEULEN, G. D., CAMPBELL, D. J. & SOMMER, C. (1992). Reduction of traffic-induced soil compaction: a synthesis. *Soil Tillage Res.*, 24 : 303-318.
- CULLEY, J. L. B. & Mc GOVERN, M. A. (1990). Single and dual probe instruments for determining water contents and bulk densities of a clay loam soil. *Soil Tillage Res.*, 16 : 245-256.
- DIAZ-FIERROS, F. & GUITIAN OJEA, F. (1968). Propiedades físicas de los principales tipos de suelos gallegos. *An. Edafol. Agrobiol.*, 27: 533-546
- ERBACH, D. C. (1987). Measurement of soil bulk density and moisture. *Trans. of the ASAE*. 30: 922-931.
- F.A.O. (1990). *Soil map of the world. Revised legend. World Resources Report nº 60*. 119 pp. Roma
- F.A.O & I.S.R.I.C. (1994). *World reference base for soil resources*. 161 pp. Roma y Wageningen.
- FREITAG, D. R. (1971). Methods of measuring soil compaction. In : *Compaction of agricultural soils*. ASAE. St Joseph. pp 47-103.
- GUITIAN OJEA, F. & CARBALLAS FERNÁNDEZ, T. (1986). *Técnicas de análisis de suelos*. Ed. Pico Sacro. Santiago de Compostela. 288 pp.
- HAKÄNSSON, I., VOORHESS, W. B. & RILEY, H. (1988). Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. *Soil Tillage Res.*, 11: 239-282.
- HARTGE, K. H. & HORN, R. (1991). *Einführung in die Bodenphysik*. Enke. Stuttgart. 303 pp.
- JONES, A. C. (1983). Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47 : 1208-1211.
- MONNIER, G. & GOSS, M. J. (Editores) (1987). *Soil compaction and regeneration*. A. A. Balkema. Rotterdam. 167 pp.
- NEIRA SEIJO, X. (1994). *Desenrolo de técnicas de manexo da auga axeitadas a un uso racional de regadíos*. Tesis Doctoral. E.P.S. de Lugo. Universidad de Santiago de Compostela. 273 pp + anexos.
- PAZ GONZALEZ, A. & NEIRA SEIJO, X. (1994). Caracterización hidrodinámica por el método del perfil instantáneo de un suelo con hidromorfía temporal: consecuencias prácticas. *Boletín de la Academia Gallega de Ciencias*, 13 : 111-123.
- PAZ GONZALEZ, A., NEIRA SEIJO, X. & CASTELAO GEGUNDE (1994). Caracterización hidrodinámica por el método del perfil instantáneo de un suelo con hidromorfía temporal: consecuencias prácticas. *Boletín de la Academia Gallega de Ciencias*, 13 : 124-140.
- SAINI, G. R. (1980). *Compacité pédogénétique et induite des sols agricoles*. Bull. Tech nº 1. Agriculture Canada. Fredericton. 35 pp
- SOANE, G. C., GODWIN, R. J. & SPOOR, G. (1986). Influence of deep loosening techniques and subsequent wheel traffic on soil structure. *Soil Tillage Res.*, 16 : 179-201.
- SMITH, D. L. O. (1987). Measurement, interpretation and modelling of soil compaction. *Soil Use and Management*, 3 : 87-93.
- SMITH, D. L. O. & DICKSON, J. W. (1990). Contribution of vehicle weight and growth pressure to soil compaction. *J. Agric. Eng. Res.*, 46: 13-29.
- VAN BAVEL, C. H. M. (1959). Soil densitometry by gamma transmission. *Soil Sci.* 87 : 50-58.

Recibido: 3/12/96

Aceptado: 10/4/97