

## VARIACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE EN ÓRDENES DE SUELOS DE COSTA RICA

Alfredo Alvarado <sup>1/</sup>\*, Warren Forsythe\*

**Palabras clave:** Densidad aparente, suelos tropicales, Inceptisoles, Ultisoles, Andisoles, Entisoles, Alfisoles y Vertisoles.

**Keywords:** Bulk density, tropical soils, Inceptisols, Ultisols, Andisols, Entisols, Alfisols, and Vertisols.

Recibido: 15/12/04

Aceptado: 09/03/05

### RESUMEN

Este estudio se basa en la información de densidad aparente de 111 perfiles de suelos, representativos de los principales órdenes de suelo descritos por varios autores en Costa Rica. El ámbito de variación de la densidad aparente en los suelos estudiados es alto y osciló entre 0,53 y 2,00 Mg m<sup>-3</sup>. En general, los valores tendieron a aumentar con la profundidad del suelo debido a la reducción de la actividad biológica desarrollada en el horizonte A. Cuando no se encuentran capas compactadas, el horizonte enriquecido con arcilla eluviada (B2t) de Ultisoles y Alfisoles presenta un incremento de la densidad aparente. Los valores bajos de densidad aparente en Andisoles se relacionan con el origen del material parental y en el caso de los Vertisoles con la densidad de partículas de la fracción esmectítica dominante.

### ABSTRACT

**Variation of bulk density in soil orders of Costa Rica.** Data from 111 profiles described by various authors was used to characterize bulk density in the following soil orders found in Costa Rica: Inceptisols (38.6% of the total soil resources), Ultisols (21%), Andisols (14.4%), Entisols (12.4%), Alfisols (9.6%), and Vertisols (1.6%). The range of variation for soils studied is 0.53 to 2.00 Mg m<sup>-3</sup>, which is high. The values of bulk density tend to increase with depth due to its lowering by greater biological activity in the A horizon. If there are no compacted layers, a significant increase is found when illuviated clay accumulates in the argillic horizon in Alfisols and Ultisols. Values of bulk density are related to the origin of parent material in Andisols and clay mineralogy in Vertisols.

### INTRODUCCIÓN

En suelos, se miden y utilizan la densidad de partículas ( $\rho_p$ ), también conocida como densidad real y densidad mineral, definida como la relación entre la masa de suelo y el volumen de sólidos del suelo ( $\rho_p = m_s / V_s$ ) y la densidad aparente ( $\rho_a$ ) definida como la relación de la masa de suelo y el volumen total o sea el volumen de partículas más el espacio entre ellas ( $\rho_a = m_s / V_t$ ).

La  $\rho_a$  se utiliza principalmente para calcular la porosidad total del suelo y por ende en estudios de relación suelo-agua, aunque también se emplea para la interpretación de análisis de laboratorio para el campo (Forsythe y Díaz-Romeu 1969). Veihmeyer y Hendrickson (1948) utilizaron la  $\rho_a$  como índice de la penetrabilidad del suelo por las raíces, mencionando que dependiendo del suelo el valor crítico para diferentes

1/ Autor para correspondencia. Correo electrónico: alfredoal@cariari.ucr.ac.cr

\* Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

cultivos varía entre 1,47 y 1,90  $\rho_a$ , valores que a su vez están en función del orden de suelo, es decir su densidad de partículas y mineralogía; en Costa Rica estudios realizados en suelos derivados de cenizas volcánicas, muestran que este tipo de suelos se compactan a valores entre 0,95 y 1,2 (Morin y Tudor 1976, Forsythe y Huertas 1979). En el área de génesis y clasificación de suelos la  $\rho_a$  se emplea para detectar (1) la presencia y el grado de desarrollo de panes endurecidos, (2) la presencia de cantidades significativas de ceniza volcánica, (3) el grado de meteorización y alteración del horizonte C formado a partir de rocas ígneas o metamórficas, (4) la posibilidad de encontrar capas que impidan el crecimiento radical y (5) pérdidas o adiciones de materiales entre horizontes (Buol *et al.* 1989).

En general, la  $\rho_a$  de los suelos minerales varía entre 0,5 y 1,8  $\text{Mg m}^{-3}$  (Marshall *et al.* 1996), excluyendo los Andisoles, valores que suelen aumentar con los incrementos de arena en el suelo, fracción que tiene una mayor densidad de partículas o menor porosidad. También es común que los valores de  $\rho_a$  aumenten cuando en algún horizonte hay migración de arcilla, tal cual ocurre en horizontes argílicos, en cuyo caso la arcilla se deposita sobre los agregados del suelo reduciendo el espacio de vacíos. Porta *et al.* (1994) mencionan valores de  $\rho_a$  ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) para suelos arenosos de 1,45-1,60, suelos arcillosos estructurados 1,05-1,10, suelos compactos 1,90-1,95 y suelos orgánicos 0,25; en general, en el cálculo de la masa de 1 ha, hasta una profundidad de 15 cm, se considera un valor de  $\rho_a$  de 1,33  $\text{Mg m}^{-3}$  para obtener una masa de suelo seco al horno (sólidos) de 2 millones de kg (Forsythe y Díaz-Romeu 1969).

Los suelos orgánicos (Histosoles) tienen valores de  $\rho_a$  entre 0,14 y 0,54  $\text{Mg m}^{-3}$  (Davis y Lucas 1959), los cuales aumentan conforme decrece su contenido de fibra por efecto de su descomposición (maduración) y también con el aumento en el contenido de la fracción mineral (Everett 1983). La  $\rho_a$  de Oxisoles es normalmente baja y puede oscilar entre 1,0 y 1,3  $\text{Mg m}^{-3}$ , dependiendo del contenido de arena (van Wambeke *et al.* 1983).

Los suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) pueden dividirse en 3 grupos: (1) las cenizas volcánicas recién depositadas con valores de  $\rho_a$  de 1,1-1,4  $\text{Mg m}^{-3}$ , (2) los suelos jóvenes en los cuales predomina la alofana en el complejo de arcilla con valores entre 0,3-0,7  $\text{Mg m}^{-3}$  y (3) los suelos más desarrollados en los que predomina la haloisita mezclada con alofana y tienen valores de  $\rho_a$  que fluctúan entre 0,7-0,9  $\text{Mg m}^{-3}$  (Alvarado *et al.* 2001).

En el caso de los Vertisoles, los valores de  $\rho_a$  están determinados en gran parte por la presencia de montmorillonita ( $\rho_p=2,5 \text{ Mg m}^{-3}$ ) y dependen de si las muestras se toman durante el ciclo húmedo o seco (lo que afecta el grado de contracción o de expansión de la masa del suelo), así como del tamaño de la muestra (lo que permite o no incluir cierto número de grietas); basados en muestras pequeñas los valores de  $\rho_a$  en Vertisoles oscilan entre 1,3 y 2,0  $\text{Mg m}^{-3}$  (Ahmad 1983).

En Costa Rica se encuentran 10 de los 12 órdenes del sistema de clasificación de suelos de los Estados Unidos de América (Soil Survey Staff 1999), de los cuales solamente 6 tienen relevancia agrícola y forestal: Inceptisoles (38,6%), Ultisoles (21%), Andisoles (14,4%), Entisoles (12,4%), Alfisoles (9,6%) y Vertisoles (1,6%), los valores en paréntesis representan el porcentaje de cobertura del país (Bertsch *et al.* 2000). El presente estudio tiene como objetivo cuantificar la variación de  $\rho_a$  en estos órdenes de suelos y relacionar los datos con factores genéticos o de manejo, cuando son pertinentes.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para la comparación de valores de  $\rho_a$  en órdenes de suelos de Costa Rica, se conformó una base de datos con 111 perfiles representativos de cada orden de suelo descritos por varios autores, en diferentes partes del país. Se usó el método de volumen conocido (Forsythe 1985) con cilindros de 7,5 cm de diámetro por 7,5 cm de largo o de 5 cm de diámetro por 5 cm de largo.

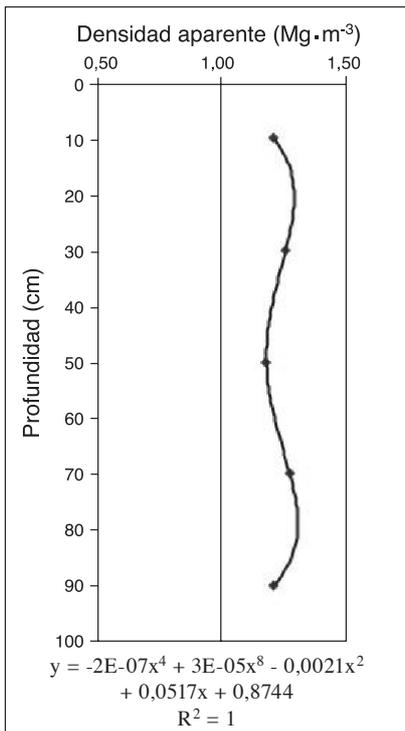
En Entisoles, Alfisoles, Mollisoles y Vertisoles se utilizó la información proporcionada por (Costa Rica/MAG/SNE/CNR/IICA 1977, Vásquez 1978, Obando 1982, Mata *et al.*1995a); Andisoles (CCT/ICE 1980, Alvarado *et al.* 2001); Ultisoles (Alvarado 1970, Mata y Ramírez 1999 y 2002) y para los Inceptisoles (Núñez 1979, Obando 1982, Mata *et al.*1995b). De estos estudios solamente se utilizaron los datos de profundidad y  $\rho_a$ .

Para cada orden de suelos, el análisis de los datos se realizó haciendo gráficos de dispersión, promedios, desviaciones estándar y coeficientes de variación tanto de los valores por horizonte en cada perfil, como en horizontes por intervalos de profundidad de 20 cm en cada perfil. En el último caso, los valores promedio de  $\rho_a$  de cada intervalo en cada orden de suelo se ajustaron a un modelo polinomial.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Entisoles

La mayoría de los Entisoles considerados en el presente trabajo son de origen aluvial y pertenecen a los subórdenes Aquents y Fluvents; los Orthents, comunes en Costa Rica, no se utilizaron debido a su poca profundidad. La variación de  $\rho_a$  en este orden oscila entre 0,87 y 1,62  $\text{Mg m}^{-3}$ , la cual se reduce a valores entre 1,11-1,26  $\text{Mg m}^{-3}$  si solo se consideran los promedios por intervalo de profundidad estudiado (Cuadro 1). Los valores más bajos se asocian a la deposición aluvial de cenizas volcánicas en las llanuras del Atlántico, a partir de las cuales se desarrollan algunas características vítricas y ándicas. Los valores más altos, pueden estar relacionados con



Cuadro 1. Valores mínimos, máximos, promedio, desviación estándar (DE) y el coeficiente de variación (CV) de la densidad aparente en 8 perfiles de Entisoles de Costa Rica.

ENTISOLES						
Prof. cm	Horizontes No.	$\rho_a \text{ Mg m}^{-3}$			DE	CV %
		Mín.	Máx.	Prom.		
0-20	10	0,88	1,35	1,12	0,14	12,48
20-40	5	1,00	1,53	1,25	0,20	16,05
40-60	10	0,87	1,67	1,26	0,27	21,45
60-80	8	0,91	1,51	1,11	0,20	18,02
80-100	10	0,93	1,62	1,22	0,22	18,05

materiales parentales de composición ferromagnesiana y bajo condiciones de cierto grado de compactación debidas al proceso de sedimentación de los materiales.

En relación con la profundidad del suelo, se puede notar un valor de  $\rho_a$  ligeramente inferior en el primer intervalo de profundidad,

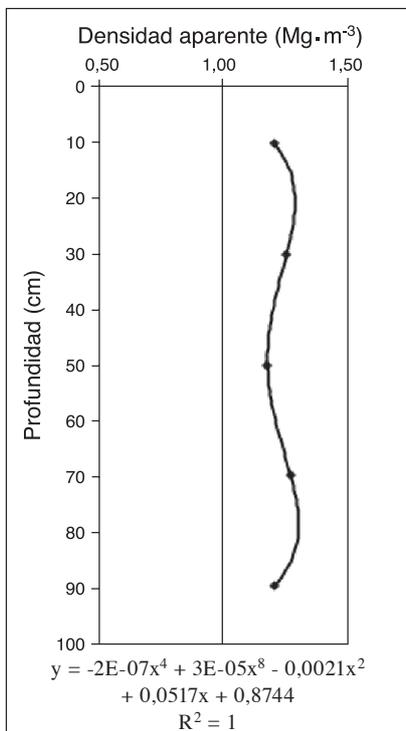
probablemente debido a una mayor actividad biológica cerca de la superficie, lo que redonda en un alto porcentaje de raíces, un mayor número de animales del suelo y una adición de residuos mayor al que ocurre en los intervalos a mayor profundidad. La  $\rho_a$  aumenta ligeramente entre 20-60 cm de profundidad, probablemente como resultado del uso pecuario al que se someten estos suelos. Entre 60 y 80 cm de profundidad, se presenta un valor de  $\rho_a$  relativamente bajo, el cual puede atribuirse a la deposición aluvial de materiales gruesos (arenas y gravas), así como a un error de muestreo asociado a un mayor contenido de humedad al momento de tomar las muestras de suelo a esta profundidad.

Desde el punto de vista genético, puede resaltarse que debido al origen aluvial de los suelos estudiados, estos Entisoles presentan una variación errática de la  $\rho_a$  que tiende a depender del origen y del tamaño de los sedimentos depositados. Debido a la pedregosidad superficial de estos suelos, el aumento de la  $\rho_a$  en los horizontes

intermedios se debe más al pisoteo del ganado que a causa de mecanización o a otros procesos genéticos de formación de suelos.

### Inceptisoles

La mayoría de los Inceptisoles bajo estudio clasifican como Udepts y Ustepts, considerándose también algunos Aquepts. Encontrándose Costa Rica en una región con alto volcanismo activo, en muchos de los suelos estudiados también se observan características ándicas, al menos en los horizontes superficiales, lo que se puede apreciar en el valor mínimo de  $\rho_a$  encontrado en este tipo de suelos. Para todos los horizontes estudiados en los 27 perfiles considerados en el presente estudio, la  $\rho_a$  osciló entre 0,67 y 1,79  $\text{Mg m}^{-3}$ , valores que varían entre 1,19 y 1,28  $\text{Mg m}^{-3}$  cuando solo se consideran promedios por intervalo de profundidad comparado (Cuadro 2). Excepción hecha de los horizontes de Inceptisoles con características ándicas, la mayoría de los valores de  $\rho_a$  en este



Cuadro 2. Valores mínimos, máximos, promedio, desviación estándar (DE) y el coeficiente de variación (CV) de la densidad aparente en 27 perfiles de Inceptisoles de Costa Rica.

INCEPTISOLES						
Prof. cm.	Horizontes No.	$\rho_a \text{ Mg m}^{-3}$			DE	CV %
		Mín.	Máx.	Prom.		
0-20	35	0,67	1,71	1,21	0,27	22,30
20-40	17	0,83	1,70	1,26	0,30	23,78
40-60	19	0,85	1,79	1,19	0,24	20,25
60-80	25	0,85	1,70	1,28	0,22	17,22
80-100	24	0,90	1,60	1,21	0,16	13,21

orden son superiores a 1,20  $\text{Mg m}^{-3}$ , encontrándose algunos horizontes inmediatamente debajo del horizonte Ap con valores más altos debido al pisoteo del ganado y del uso de maquinaria agrícola, tal cual mencionan Agüero y Alvarado (1973), quienes además demuestran la influencia del material parental sobre los valores de densidad máxima en cada tipo de suelo. Los valores

altos de  $\rho_a$  encontrados en los horizontes más profundos, se asocian a Inceptisoles evolucionados como los Dystrudepts y los Dystrustepts.

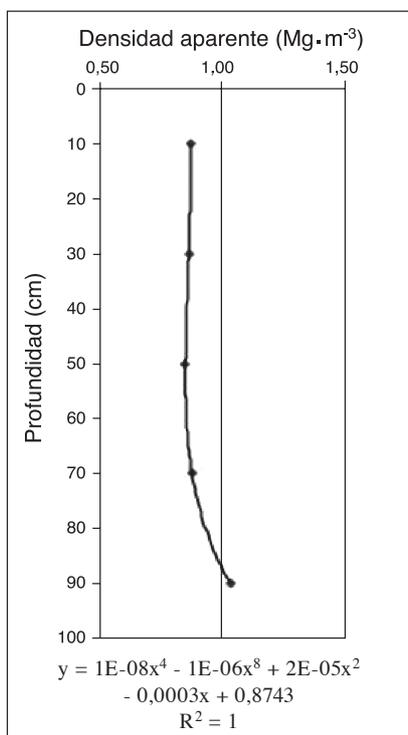
La ocurrencia de Inceptisoles en relieves inclinados, limita un tanto su mecanización, por lo que la presencia de pisos de arado con una  $\rho_a$  elevada, son poco frecuentes. Sin embargo, el efecto del pisoteo por el ganado a una profundidad de 10-20 cm es común en ellos, lo que afecta negativamente el desarrollo del sistema radical de los cultivos y en muchos casos reduce la velocidad de infiltración, con el consecuente incremento en la tasa de erosión de estos suelos.

### Andisoles

La mayor parte de los Andisoles considerados en el presente trabajo clasifican como Hapludands y Haplustands, aunque también se incluyen algunos Melanudands y Udivitrands, clasificados como tales cuando aun tenían como

requisito una  $\rho_a$  menor a  $0,85 \text{ Mg m}^{-3}$ . El ámbito de variación de la  $\rho_a$  encontrado en el estudio indica valores entre  $0,55$  y  $1,46 \text{ Mg m}^{-3}$ , aunque considerando solo los promedios para cada intervalo de profundidad estudiado los valores oscilaran entre  $0,85$  y  $1,03 \text{ Mg m}^{-3}$  (Cuadro 3). En el estudio sorprende la poca variación de la  $\rho_a$  con la profundidad, pues a menudo se encuentran horizontes A enterrados, en los cuales el elevado contenido de materia orgánica asociado a la mineralogía amorfa disminuye los valores de este parámetro; sin embargo, los promedios por intervalo se encuentran todos a valores menores a  $0,95 \text{ Mg m}^{-3}$ , considerado como máximo para la clasificación de este tipo de suelos.

La variación de la  $\rho_a$  en Andisoles de Costa Rica fue discutida por Alvarado *et al.* (2001), autores que atribuyen los valores altos al poco grado de meteorización de los Udivitrands, suelos que además tienen una  $\rho_p$  elevada. En general, cuando las cenizas volcánicas están



Cuadro 3. Valores mínimos, máximos, promedio, desviación estándar (DE) y el coeficiente de variación (CV) de la densidad aparente en 14 perfiles de Andisoles de Costa Rica.

ANDISOLES						
Prof. cm	Horizontes No.	$\rho_a \text{ Mg m}^{-3}$			DE	CV %
		Mín.	Máx.	Prom.		
0-20	14	0,55	1,12	0,87	0,17	19,49
20-40	11	0,76	1,00	0,86	0,08	9,27
40-60	10	0,59	1,18	0,85	0,19	22,35
60-80	10	0,65	1,10	0,88	0,15	17,12
80-100	12	0,67	1,46	1,03	0,21	20,36

recientemente depositadas, la  $\rho_a$  oscila entre 1,1 y  $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$ , en los suelos jóvenes en los que domina la alofana en el complejo de arcilla entre 0,3 y 0,7 y en suelos más desarrollados en los que predomina la haloisita mezclada con la alofana entre 0,7 y  $0,9 \text{ Mg m}^{-3}$ , respectivamente. Ninguno de los valores mencionados afecta el crecimiento del sistema radical de los cultivos, y más bien

favorecen la utilización de maquinaria agrícola de poco peso, con lo que se reduce la posibilidad de compactarlos y erosionarlos.

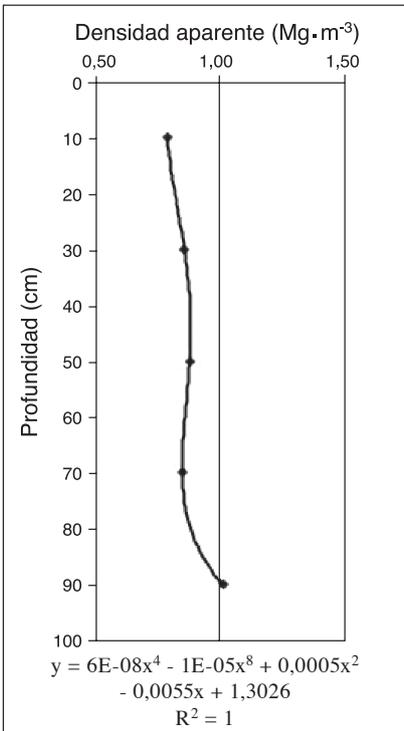
**Mollisoles**

Los Mollisoles de Costa Rica ocupan una extensión relativamente pequeña (1,4% del territorio cartografiado del país) y en su mayoría dentro del régimen de humedad ústico del Pacífico Norte y Central, por lo que clasifican como Udolls y Ustolls, algunos con características vérticas (Bertsch *et al.* 2000). El ámbito de variación de la  $\rho_a$  entre horizontes del suelo se encuentra entre 0,88 y 1,70  $Mg\ m^{-3}$ , y el promedio entre intervalos de profundidad comparados entre 1,17 y 1,24  $Mg\ m^{-3}$  (Cuadro 4). La mayoría de los valores de  $\rho_a$  concuerdan con las características requeridas para el reconocimiento del epipedón móllico, el cual no puede ser ni duro, ni masivo, y se asocia a un contenido de materia orgánica

relativamente alto, en particular en los horizontes superiores. La disminución del contenido de materia orgánica con la profundidad ayuda a explicar los pocos valores elevados encontrados cerca de la superficie del suelo, los cuales se asocian a procesos de compactación por maquinaria agrícola, así como a la dominancia de la mineralogía esmectítica en los Ustolls y Vertisoles asociados en los ambientes ústicos.

**Alfisoles y Ultisoles**

Estos 2 órdenes de suelos tienen en común la presencia de un horizonte enriquecido con arcilla iluviada (B2t) de horizontes superficiales (E), conocido como horizonte argílico, el cual se encuentra a cierta profundidad en el perfil del suelo, a menos que este haya sido erosionado y se encuentre expuesto en la superficie (Soil Survey Staff 1999). La principal diferencia entre estos 2 tipos de suelo estriba en que en los Alfisoles la



Cuadro 4. Valores mínimos, máximos, promedio, desviación estándar (DE) y el coeficiente de variación (CV) de la densidad aparente en 16 perfiles de Mollisoles de Costa Rica.

MOLLISOLES						
Prof. cm	Horizontes No.	$\rho_a\ Mg\ m^{-3}$			DE	CV %
		Mín.	Máx.	Prom.		
0-20	25	0,98	1,65	1,20	0,19	15,85
20-40	16	0,91	1,52	1,21	0,18	14,91
40-60	18	0,88	1,41	1,17	0,18	15,34
60-80	14	0,88	1,48	1,24	0,22	17,71
80-100	20	0,88	1,70	1,23	0,25	20,26

saturación de bases en el horizonte argílico es superior al 35%, mientras que en los Ultisoles es inferior a este valor.

En Costa Rica, estos suelos generalmente se encuentran en las regiones geológicas más antiguas (Terciario o más) y su saturación de bases está muy ligada a la distribución y cantidad de la lluvia durante el año, por lo que los Alfisoles

tienden a encontrarse más en las regiones con época seca definida y los Ultisoles en zonas donde llueve más y durante casi todo el año.

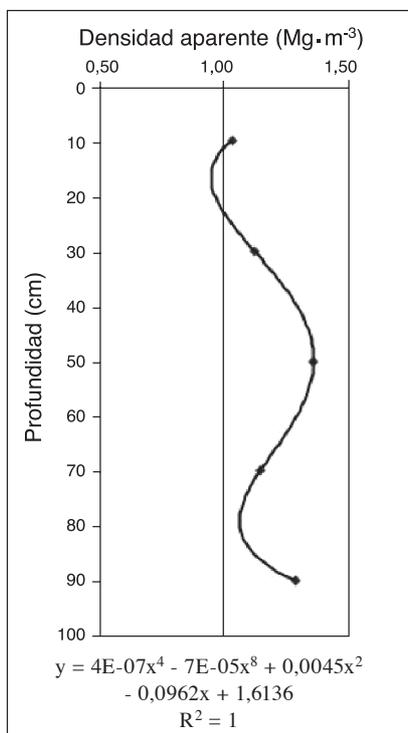
La  $\rho_a$  ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) en todos los horizontes estudiados de ambos órdenes oscila entre 0,53 y 1,83, con valores entre 0,96 y 1,42 cuando se comparan los promedios por intervalo de profundidad estudiado (Cuadros 5 y 6); los datos de van Wambeke *et al.* (1983) para Oxisoles, son similares a los encontrados en el presente estudio para estos 2 órdenes de suelos. En relación con la profundidad del suelo, se puede notar un valor de  $\rho_a$  ligeramente inferior en el primer intervalo de profundidad, probablemente debido a una mayor actividad biológica cerca de la superficie, lo que redundaría en un alto porcentaje de raíces, un mayor número de animales del suelo y una adición de residuos mayor al que ocurre en los intervalos a mayor profundidad.

En el horizonte argílico los valores de  $\rho_a$  ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) aumentan a 1,36-1,42, evidenciando la

acumulación de arcilla sobre los pedos a expensas del volumen de vacíos del horizonte B2t. Entre 60 y 80 cm de profundidad, se presenta otro valor de  $\rho_a$  relativamente bajo, el cual puede atribuirse a un error de muestreo asociado a un mayor contenido de humedad al momento de tomar las muestras de suelo a esta profundidad.

### Vertisoles

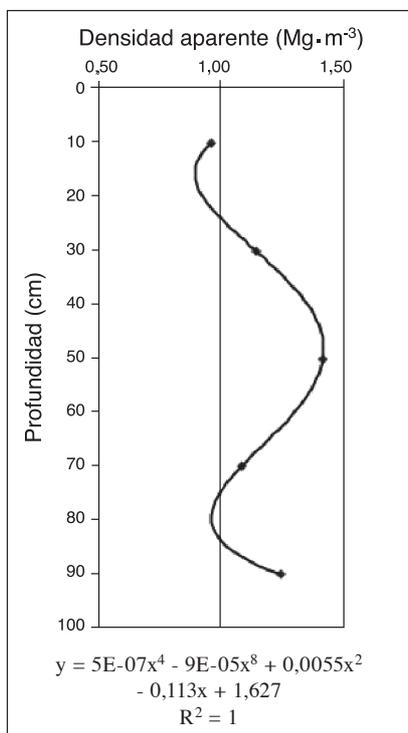
De los suelos bajo estudio en Costa Rica, este es el orden que ocupa una menor extensión y su importancia radica en el hecho de que se encuentran asociados a otros órdenes de relevancia agrícola. Los valores de  $\rho_a$  ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) de estos suelos son los más altos de todos los comparados (0,92-2,00), aunque sean más bajos cuando se consideran los promedios por intervalo de profundidad comparado (1,29-1,51) (Cuadro 7); todos los valores en Costa Rica concuerdan con los promedios de  $\rho_a$  mencionados en la literatura para



Cuadro 5. Valores mínimos, máximos, promedio, desviación estándar (DE) y el coeficiente de variación (CV) de la densidad aparente en 8 perfiles de Alfisoles de Costa Rica.

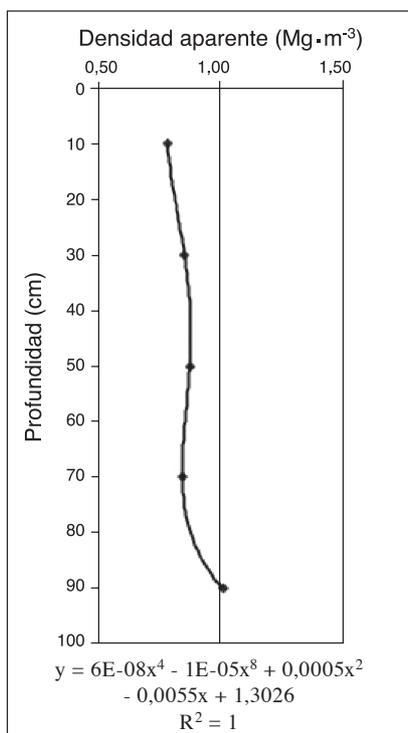
ALFISOLES						
Prof. cm	Horizontes No.	$\rho_a$ $\text{Mg m}^{-3}$			DE	CV %
		Mín.	Máx.	Prom.		
0-20	10	0,60	1,41	1,03	0,22	21,36
20-40	9	0,80	1,52	1,12	0,22	19,68
40-60	4	1,22	1,55	1,36	0,14	10,33
60-80	6	0,82	1,58	1,14	0,26	22,77
80-100	5	0,99	1,78	1,28	0,29	22,62

Vertisoles del mundo (Ahmad 1983). Asociado al proceso de formación de este tipo de suelos, no se encontró variación significativa de los valores de  $\rho_a$  por intervalo de profundidad, excepto por un ligero incremento de la misma cuando se muestrea el horizonte C, con características muy relacionadas con el material parental (en el presente caso tobas riolíticas).



Cuadro 6. Valores mínimos, máximos, promedio, desviación estándar (DE) y el coeficiente de variación (CV) de la densidad aparente en 15 perfiles de Ultisoles de Costa Rica.

ULTISOLES						
Prof. cm	Horizontes No.	$\rho_a \text{ Mg m}^{-3}$			DE	CV %
		Mín.	Máx.	Prom.		
0-20	21	0,53	1,50	0,96	0,28	29,07
20-40	16	0,72	1,74	1,15	0,30	26,20
40-60	7	1,15	1,83	1,42	0,24	16,88
60-80	9	0,70	1,50	1,08	0,23	21,21
80-100	12	0,86	1,83	1,25	0,27	21,67



Cuadro 7. Valores mínimos, máximos, promedio, desviación estándar (DE) y el coeficiente de variación (CV) de la densidad aparente en 20 perfiles de Vertisoles de Costa Rica.

VERTISOLES						
Prof. cm	Horizontes No.	$\rho_a \text{ Mg m}^{-3}$			DE	CV %
		Mín.	Máx.	Prom.		
0-20	27	0,98	1,78	1,29	0,21	16,32
20-40	16	0,92	1,80	1,35	0,32	23,63
40-60	15	1,05	1,83	1,38	0,26	18,91
60-80	15	1,09	1,95	1,35	0,25	18,57
80-100	15	1,06	2,00	1,51	0,30	19,90

## CONCLUSIONES

- Los valores de  $\rho_a$  ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) en 9 órdenes de suelos del mundo oscilan entre 0,14-2,00. Los valores más bajos se encuentran en los Histosoles y Andisoles, mientras que los más elevados ocurren en Vertisoles (Cuadro 8).
- El ámbito de variación de  $\rho_a$  ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) en suelos minerales de Costa Rica es alto (0,53 y 2,00) y en el presente trabajo los coeficientes de variación por horizonte y por intervalo de profundidad en cada orden de suelo oscilaron entre 9,27-29,07%, debido

- En suelos minerales, la  $\rho_a$  está relacionada con el material parental de los suelos (caso de los Andisoles) y de la mineralogía de la fracción arcillosa (caso de los Vertisoles).

## LITERATURA CITADA

- AGÜERO J.M., ALVARADO A. 1983. Compactación y compactibilidad de suelos agrícolas y ganaderos de Guanacaste, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 7(1/2): 23-27.
- AHMAD N. 1983. Vertisols. *In*: L.P. Wilding, N.E. Smeck, G.F. Hall (eds.). *Pedogenesis and Soil Taxonomy*. II.

Cuadro 8. Variación de la densidad aparente en 9 órdenes de suelos (0-100 cm de profundidad) de Costa Rica y del mundo.

Orden de suelo	$\rho_a$ $\text{Mg m}^{-3}$		Referencia
	Este trabajo	Otros trabajos	
Histosol		0,14-0,54	Davis y Lucas 1959
Entisol	0,87-1,62		
Inceptisol	0,67-1,79		
Andisol	0,55-1,46	0,70-1,40	Alvarado <i>et al.</i> 2001
Mollisol	0,88-1,70		
Alfisol	0,60-1,78		
Ultisol	0,53-1,83		
Oxisol		1,00-1,30	Van Wambeke <i>et al.</i> 1983
Vertisol	0,92-2,00	1,30-2,00	Ahmad 1983

probablemente a que los datos empleados provienen de diferentes fuentes.

- Los valores de  $\rho_a$  ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) tienden a aumentar con la profundidad del suelo, debido a la mayor actividad biológica en el horizonte A y en algunos casos se observa un aumento a profundidades intermedias asociado al pisoteo del ganado y a la carga mecánica aplicada cuando se cultivan. Si no se presenta compactación del suelo, solamente se encuentra un aumento significativo de  $\rho_a$  cuando se acumula arcilla iluviada en los horizontes argílicos de Alfisoles y Ultisoles.

Soil Orders. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands. p. 91-123.

- ALVARADO A. 1970. Estudio edafológico y agrológico de las sabanas de Buenos Aires de Puntarenas. Tesis Ing. Agr., Facultad de Agronomía, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 116 p.

- ALVARADO A., BERTSCH F., BORNEMISZA E., CABALCETA G., FORSYTHE W., HENRÍQUEZ C., MATA R.A., MOLINA E., SALAS R. 2001. Suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) de Costa Rica. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo y Centro de Investigaciones Agronómicas/Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 111 p.

- BERTSCH F., ALVARADO A., HENRÍQUEZ C., MATA R. 2000. Properties, geographic distribution, and management of major soil orders of Costa Rica. *In*: Ch. A. S. Hall (ed.) Quantifying sustainable development, the future of tropical economies. Academic. p. 265-294.
- BUOL S.W., HOLE F.D., MCCRAKEN R.J. 1989. Soil genesis and classification. Ames, Iowa. Iowa State University Press. 446 p.
- CENTRO CIENTÍFICO TROPICAL, INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD (CCT/ICE). 1980. Estudio ecológico integral de las zonas de afectación del Proyecto Arenal. Parte I. San José, Costa Rica. 229 p.
- COSTA RICA, MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA, SERVICIO NACIONAL DE ELECTRICIDAD, COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO, INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRÍCOLAS (COSTA RICA/MAG/SNE/CNR/IICA). 1977. Estudio detallado de suelos y clasificación de tierras según su aptitud al riego. Informe Final No 1. San José, Costa Rica. 117 p.
- DAVIS J.F., LUCAS R.E. 1959. Organic soils, their formation, distribution, utilization and management. East Lansing, Michigan. Department Soil Science, Agricultural Experiment Station, Michigan State University. Special Bulletin No. 425. 156 p.
- EVERETT K.R. 1983. Histosols. *In*: L.P. Wilding, N.E. Smeck, G.F. Hall (eds.). Pedogenesis and soil taxonomy. II. Soil orders. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands. p. 1-53.
- FORSYTHE W. 1985. Física de suelos: manual de laboratorio. IICA. San José. Costa Rica. 212 p.
- FORSYTHE W., DÍAZ-ROMEU R. 1969. La densidad aparente del suelo y la interpretación de análisis de laboratorio para el campo. Turrialba 19(1): 128-131.
- FORSYTHE W., HUERTAS A. 1979. Effect of soil penetration resistance on the growth and yield of beans. (*Phaseolus vulgaris*) 27-R variety. Turrialba 29: 293-298.
- MARSHALL T.J., J.W. HOLMES, C.W. ROSE. 1996. Soil physics. Cambridge, England. Press Syndicate of the University of Cambridge. 453 p.
- MATA R.A., RAMÍREZ J.E. 1999. Estudio de caracterización de suelos y su relación con el manejo del cultivo de café en la Provincia de Heredia. Instituto del Café de Costa Rica, Centro de Investigaciones en Café, Departamento de Investigación y Transferencia de Tecnología del Café. San José, Costa Rica. 91 p.
- MATA R.A., RAMÍREZ J.E. 2002. Caracterización de suelos y cultivo de café en el cantón de Pérez Zeledón. Instituto del Café de Costa Rica, Centro de Investigaciones en Café, Departamento de Investigación y Transferencia de Tecnología del Café. San José, Costa Rica. 101 p.
- MATA R.A., MOLINA E., ALVARADO A. 1995a. Estudio semidetallado de suelos del subdistrito de riego de Abangares, Guanacaste. Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 181 p.
- MATA R.A., MOLINA E., ALVARADO A. 1995b. Estudio semidetallado de suelos de fincas Peñas Blancas y Santa Cecilia, La Cruz, Guanacaste. Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 116 p.
- MORIN W.J., TODOR P.C. 1976. Laterite and lateritic soils and other problem soils of the tropics. Lyon Associates, Inc. Baltimore, Maryland USA. Road Reserach Institute. Brazilian Nacional Highway Department. Río de Janeiro. Brasil. AID/csd 3682. Vol. I. 369 p.
- NÚÑEZ J. 1979. Cartografía detallada de los suelos de la finca Peñas Blancas, San Carlos. Tesis Ing. Agr., Facultad de Agronomía, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 251 p.
- OBANDO O. 1982. Estudio semidetallado de suelos y clasificación de tierras por su aptitud: H. Agropecuaria Tica Sociedad Anónima. San José, Costa Rica. 82 p.
- PORTA J., LÓPEZ M., ROQUERO C. 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 807 p.
- SOIL SURVEY STAFF. 1999. Soil taxonomy, a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. USDA-NRCS. Agriculture Handbook No. 436. 869 p.
- VAN WAMBEKE A., ESWARAN H., HERBILLON A.J., COMERMA J. 1983. Oxisols. *In*: L.P. Wilding, N.E. Smeck, G.F. Hall (eds.). Pedogenesis and soil taxonomy. II. Soil orders. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands. p. 325-353.
- VÁSQUEZ A. 1978. Estudio semidetallado de suelos de la cuenca baja del río Tempisque. Costa Rica, Departamento de Riego y Avenamiento/Servicio Nacional de Electricidad y Departamento de Suelos/Ministerio de Agricultura y Ganadería San José, Costa Rica. 159 p.
- VEIHMEYER F.J., HENDRICKSON A.H. 1948. Soil density and root penetration. Soil science 65:487-493.