

# DENSIDAD APARENTE DE DOS SUELOS DE LA ZONA CAFETERA Y EFECTO SOBRE EL CRECIMIENTO DEL CAFETO

Alveiro Salamanca-Jiménez\*; Siavosh Sadeghian-Khalajabadi\*; Edgar Amézquita-Collazos\*\*

---

## RESUMEN

**Salamanca J., A.; Sadeghian K., S.; Amézquita C., E. Densidad aparente de dos suelos de la zona cafetera y efecto sobre el crecimiento del cafeto. Cenicafé 55(4): 330-340. 2004**

Con el fin de estudiar el efecto de la densidad aparente (DA) del suelo sobre el crecimiento temprano del café, se realizó un experimento en la Estación Central Naranjal de Cenicafé, empleando dos suelos provenientes de las unidades Chinchiná y San Simón, contrastantes en su DA (0,69 y 1,38g.cm<sup>-3</sup>, respectivamente) y material de origen. Se evaluaron cinco tratamientos que incluyeron la DA determinada en campo y este valor aumentado y reducido en 10% y 20%, obtenidos mediante la adición y/o compactación del suelo en materos plásticos de 9,5 litros. En cada matero se sembró una plántula de café variedad Caturra de 45 días de germinada. Durante 216 días se evaluó la altura de las plantas cada 15 días y al final, se determinaron los pesos secos de raíces y parte aérea y el contenido foliar de elementos. En la unidad Chinchiná la altura y pesos secos presentaron mayores valores para niveles intermedios de DA (0,63 y 0,69g.cm<sup>-3</sup>) y disminuyeron con la compactación (0,80g.cm<sup>-3</sup>) y el suelo muy suelto (0,57g.cm<sup>-3</sup>); mientras que para San Simón, se encontró una relación inversa entre la DA y estas variables. En los dos suelos, la absorción de nutrientes estuvo relacionada con su nivel de fertilidad, pH y materia orgánica.

**Palabras claves:** Densidad aparente, Unidad Chinchiná, Unidad San Simón, compactación de suelos, café, variedad Caturra.

---

## ABSTRACT

To study the soil bulk density (BD) effect on coffee growth an experiment was carried out, in the Cenicafé Central Station Naranjal, using soils from the Chinchiná unity and the San Simón unity with different BD (0.69 and 1.38g.cm<sup>-3</sup>, respectively). Five treatments that included the BD determined under field conditions and this value increased and decreased in 10 and 20 %, obtained by soil addition and/or soil compaction in 9.5 liter plastic pots, were evaluated. 45 days old coffee seedlings were planted (one plant/pot). The height of the plants was evaluated during 216 days each 15 days. Dry weights of both root and shoot and element content in leaves were measured at the end of experiment. The Chinchiná unity exhibited high values for heights and dry weights with middle levels of BD (0.63 and 0.69g.cm<sup>-3</sup>) and low values with both compaction (0.80g.cm<sup>-3</sup>) and very loose soil (0.57g.cm<sup>-3</sup>) conditions, whereas for the San Simon unity an inverse relation between BD and these variables were showed. In both soils, the nutrients absorption was associated with fertility level, pH and organic matter.

**Keywords:** Bulk density, Chinchina Unity, San Simon Unity, soil compaction, coffee, Caturra variety.

---

\* Asistente de Investigación. Suelos. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

\*\* Físico de Suelos. Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT. Cali, Colombia

Las propiedades físicas del suelo influyen directamente en el desarrollo radical de los cultivos y por ende en su productividad (26). Entre estas propiedades, las más importantes son: densidad aparente (DA), textura, estructura (2), régimen de humedad, temperatura (22), profundidad efectiva, aireación, contacto lítico y consistencia (16).

La DA establece la relación entre la masa del suelo (incluyendo el arreglo estructural) y su volumen (12). Se utiliza para calcular la porosidad y la humedad volumétrica, convertir pesos a volúmenes (11), estimar el coeficiente de expansión lineal y la lámina de agua, clasificar suelos orgánicos y/o derivados de cenizas volcánicas (23), y algunas veces, para estimar la cantidad de elementos en una determinada profundidad del perfil (14).

La DA afecta el grado de resistencia física que ejercen los suelos al crecimiento y funcionamiento del sistema radical (36). El aumento de la DA, como consecuencia de la compactación, disminuye la macroporosidad y la aireación, incrementa la resistencia mecánica a la penetración (5), afecta la absorción normal de nutrimentos y del agua, impide la actividad microbiana, reduce la infiltración (8), e induce cambios de la estructura y del comportamiento funcional del suelo (30). Lo anterior afecta directamente a las raíces, e indirectamente a las partes aéreas (37), y hace que ante condiciones contrastantes de DA (compactación o suelo muy suelto), las plantas reduzcan o detengan su crecimiento y alteren su morfología (25).

Diversos estudios registran el efecto de la DA del suelo sobre el crecimiento de algunos cultivos, en su mayoría de ciclo corto como: arveja (31), cebada (20), maíz (34), fríjol (15), soya (28) y banano (6), entre otros. En café, no existe información al respecto o es muy limitada. La DA únicamente se ha tenido en cuenta, junto con otros factores, por Valencia (35), como un criterio teórico para estimar la producción

relativa de un sitio determinado, calcular los nutrientes necesarios y ajustar los requerimientos de fertilizante que el café necesita para mantener altos rendimientos.

La presente investigación, buscó generar conocimientos acerca del efecto de la DA del suelo sobre el crecimiento vegetativo del café.

## MATERIALES Y METODOS

**Localización y duración.** El estudio se llevó a cabo entre abril y noviembre de 2003 en la Estación Central Naranjal, ubicada en el municipio de Chinchiná (Caldas - Colombia), a 75°39' Longitud Oeste, 4°59' Latitud Norte, con 1.400m de altitud, temperatura promedio de 20,6°C y 75% de humedad relativa.

**Características de los suelos.** Se utilizaron suelos de cafetales tecnificados, provenientes de dos unidades cartográficas de la zona cafetera colombiana (Chinchiná y San Simón), contrastantes en DA y material de origen. Algunas de sus características físicas y químicas, se incluyen en las Tablas 1 y 2, respectivamente.

**Tratamientos.** Se definieron 5 tratamientos de DA para cada Unidad de suelo:

1. Valor registrado en el campo (DC)
2. DC reducido en 10% (DC - 10%)
3. DC reducido en 20% (DC - 20%)
4. DC aumentado en 10% (DC + 10%)
5. DC aumentado en 20% (DC + 20%)

Se adicionaron los suelos en materos plásticos de forma trapezoidal con una capacidad de 9,5 litros, fueron adicionados y diferencialmente compactados los suelos, hasta obtener las densidades definidas como tratamientos.

**Tabla 1.** Clasificación y características físicas de los suelos.

Unidad de Suelo	Clasificación taxonómica	Material parental	Prof (cm)	DA (g.cm <sup>-3</sup> )	DR (g.cm <sup>-3</sup> )	MaP	MeP (%)	MiP (%)	CH (cm.h <sup>-1</sup> )	A	L (%)	Ar (%)	RP (kg.cm <sup>-2</sup> )
Chinchiná	Melanudands	Ceniza volcánica	0-15	0,78	2,35	21,32	17,32	28,02	24,46	49,08	30,92	20,00	1,19
			15-30	0,74	2,42	20,13	20,44	28,84	6,73	48,37	35,68	15,95	1,92
San Simón	Eutropepts biotítico	Granito	0-15	1,30	2,64	18,65	13,34	18,73	43,97	53,97	17,13	28,89	2,22
			15-30	1,39	2,68	20,26	11,32	16,89	30,72	54,88	17,36	27,76	3,38

DA: Densidad aparente. DR: Densidad real. MaP: Macroporos. MeP: Mesoporos. MiP: Microporos. CH: Conductividad hidráulica. A: Arenas. L: Limos. Ar: Arcillas. RP: Resistencia a la penetración.

**Tabla 2.** Características químicas de los suelos.

Unidad de suelo	Prof (cm)	pH	N (%)	MO (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup> )	Al (cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup> )	CIC (%)	P (ppm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	B (ppm)	S (ppm)
Chinchiná	0-15	5,0	0,47	12,2	0,25	1,0	0,4	0,04	1,7	19	32	257	23	6	23	0,8	19,7
	15-30	5,1	0,40	9,9	0,10	0,2	0,1	0,02	0,9	15	2	192	11	2	8	0,5	9,4
San Simón	0-15	5,9	0,32	7,5	0,31	9,7	3,1	0,02	0,1	12	17	258	83	3	2	0,9	2,1
	15-30	5,9	0,24	5,4	0,22	8,0	3,0	0,03	0,0	12	9	236	58	2	2	0,7	1,6

Para ello, se midió la humedad del suelo antes de llenar los materos.

Debido al reacomodo del suelo durante el desarrollo del experimento, se determinaron los valores finales de la DA, los cuales se utilizaron para el análisis de los resultados (Tabla 3).

**Establecimiento y manejo de las plantas.** En cada matero se transplantó una plántula emergida de café variedad Caturra de 45 días de emergencia (chapola). Todas las plantas crecieron bajo una estructura con cubierta de plástico y se regaron cada tres días con una lámina de agua de 5mm, aproximadamente. En dos oportunidades (a los 60 y 120 días después del transplante), se aplicaron 5 gramos de DAP por planta.

**Diseño experimental y variables evaluadas.** Se utilizó un diseño de Bloques Completos al Azar con 8 repeticiones. Durante 216 días se midió la altura de las plantas con intervalos aproximados de 15 días y al final del experimento se determinó el peso seco de las raíces y la parte aérea de la planta, así como los contenidos foliares de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu y B.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Efecto de la DA sobre el crecimiento.** En la Figura 1 se presenta el comportamiento del crecimiento de las plantas a través del tiempo para las dos unidades de suelo. En ambos casos, el incremento de la DA afectó de manera negativa el crecimiento del café.

En la unidad Chinchiná, la altura de las plantas fue similar en todos los tratamientos durante los primeros 153 días después del transplante. A partir de esta fecha se registraron diferencias significativas (prueba Duncan al 5%) entre la mayor DA (0,80g.cm<sup>-3</sup>) y los valores medios (0,63 y 0,69g.cm<sup>-3</sup>) hasta el final del experimento; momento en el cual, el tra-

**Tabla 3.** Valores finales de la DA para cada tratamiento y Unidad de suelo.

Tratamiento	DA (g.cm <sup>-3</sup> )	
	Unidad Chinchiná	Unidad San Simón
DC	0,69	1,38
DC - 10%	0,57	1,20
DC - 20%	0,63	1,27
DC + 10%	0,75	1,45
DC + 20%	0,80	1,57

tamiento más compactado presentó diferencias con respecto a los cuatro restantes.

Para la unidad San Simón las diferencias empezaron a notarse desde el día 82 y se hicieron más evidentes a través del tiempo, hasta la evaluación final. El mayor crecimiento se observó para la menor DA (1,20g.cm<sup>-3</sup>) y conforme aumentó la densidad se redujo de manera proporcional la altura de las plantas.

En la Figura 2 se presentan las tasas de crecimiento diario (TC) de las plantas para todos los tratamientos por unidad de suelo. Los mayores valores se obtuvieron con densidades de 0,63g.cm<sup>-3</sup> en la U. Chinchiná y 1,20g.cm<sup>-3</sup> en la U. San Simón, mostrando tendencias de tipo cuadrático y lineal inverso, respectivamente, explicadas mediante las siguientes ecuaciones:

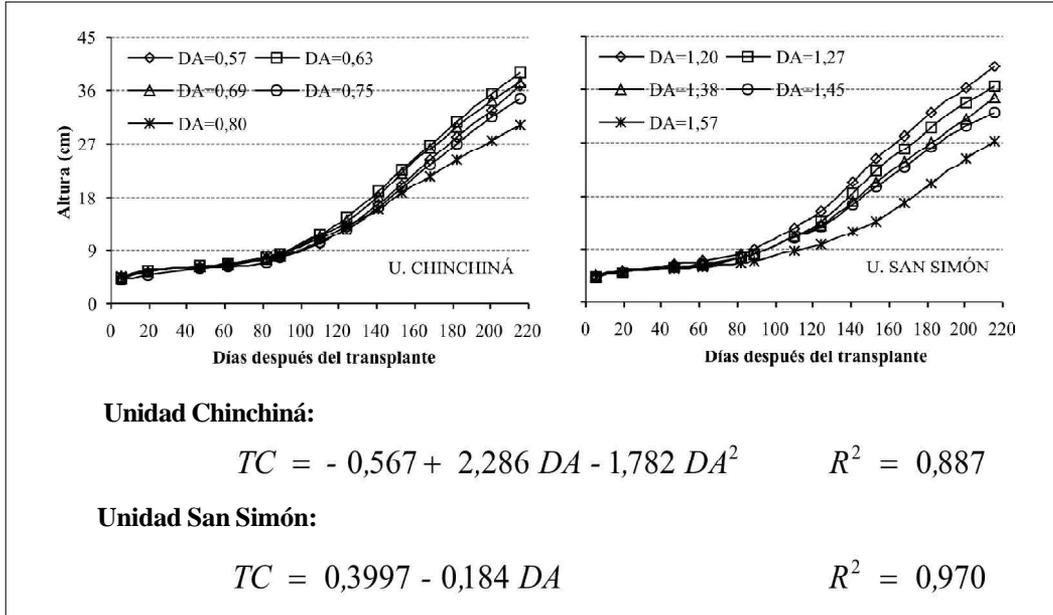


Figura 1. Comportamiento de la altura del cafeto a través de tiempo en dos unidades de suelos con diferentes DA.

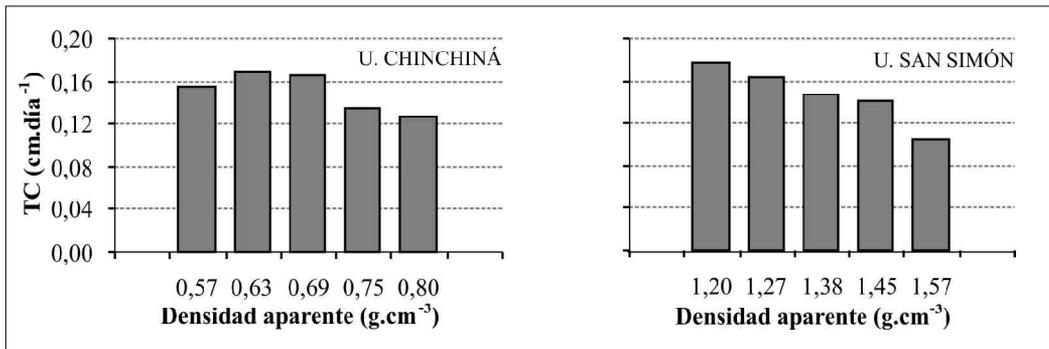


Figura 2. Tasa de crecimiento diario (TC) en plantas de café establecidas en dos unidades de suelos con diferentes DA.

Estas ecuaciones indican que:

En la unidad Chinchiná, la “*DA óptima*”, correspondiente al punto máximo de la curva, es  $0,64\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Cuando la DA aumenta o disminuye con respecto a este valor, se producen efectos negativos sobre la tasa de crecimiento del café, los cuales son más marcados al incrementar la compactación del suelo.

En San Simón, al incrementar la DA en una unidad, a partir de  $1,20\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , la tasa de crecimiento del café experimenta una reducción equivalente a  $0,184\text{cm}\cdot\text{día}^{-1}$ .

Respecto a la altura final de las plantas (Figura 3), en la unidad Chinchiná los valores más altos se obtuvieron para densidades medias ( $0,63$  y  $0,69\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ), mientras que las menores alturas se registraron en los tratamientos con mayor compactación ( $>0,75\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ). La DA más baja ( $0,57\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) también afectó negativamente el crecimiento del cafeto.

En la unidad San Simón, la altura final de las plantas fue mayor al reducir la DA, obteniéndose el valor más alto con la menor densidad ( $1,20\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ). La disminución de la altura

al aumentar la DA, indica que las condiciones físicas del suelo derivadas de la compactación ejercen efectos negativos sobre el crecimiento del café durante su fase vegetativa temprana.

Resultados similares han sido encontrados en plantas de cebada por Storzaker *et al.* (31). Tanto la compactación, como el suelo muy suelto, reducen en algunos casos el crecimiento de las plantas (25), debido a que limitan la absorción de agua y nutrientes (10). Cuando el suelo es muy suelto se reduce el contacto de las raíces con las partículas (19), mientras que con la compactación se afecta el espacio poroso, al disminuir los macroporos (18) y aumentar los microporos (29), se reduce la aireación y aumenta la resistencia a la penetración (9), se limita el desarrollo de raíces (1), y por ende, el crecimiento de las plantas.

**Efecto de la DA sobre la biomasa.** Los pesos secos de raíces y parte aérea presentaron comportamientos similares a la altura (Figura 4). Los mayores y menores valores se obtuvieron en la unidad San Simón, encontrándose una relación inversa y significativa entre la DA y la producción de biomasa, lo cual puede atribuirse a la reducción de la macroporosidad

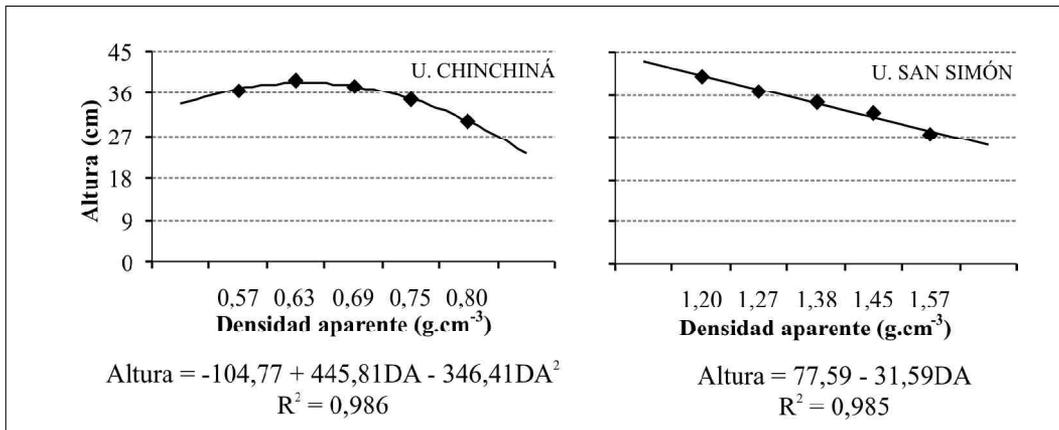


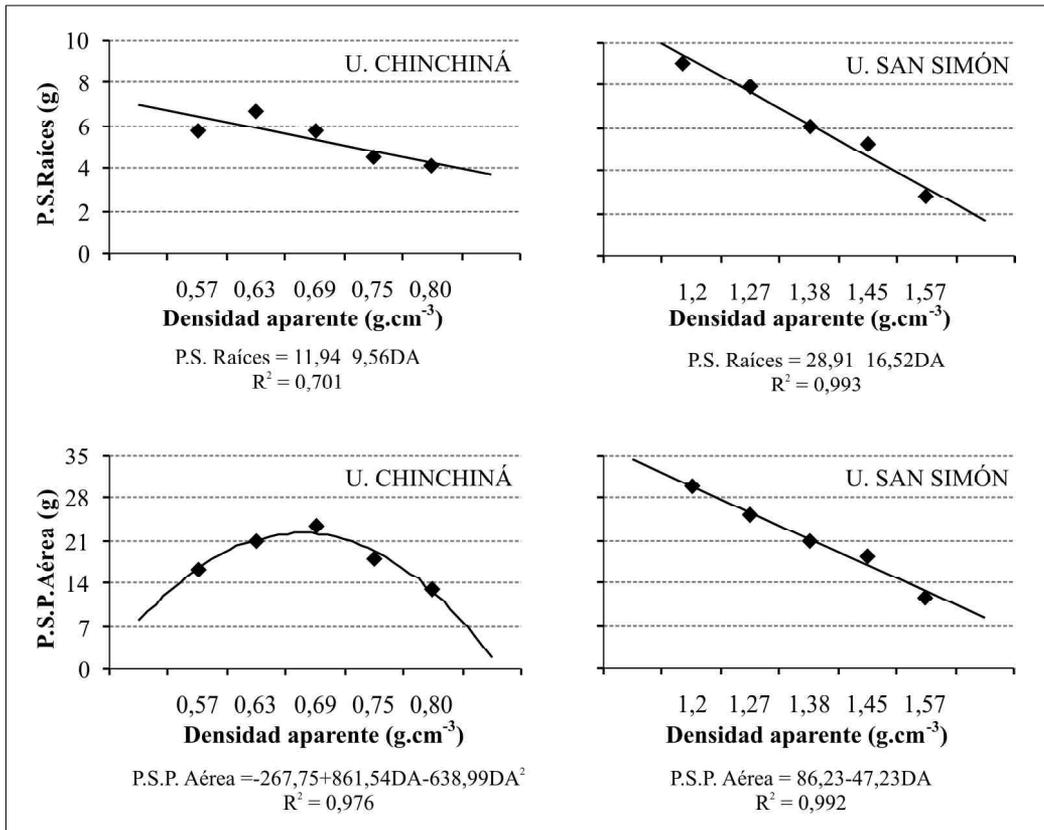
Figura 3. Valores promedio de altura final en plántulas de café establecidas en dos unidades de suelos con diferentes DA.

causada por la compactación, sin descartar que el esfuerzo radical para explorar el suelo pudo ser mayor.

En la unidad Chinchiná también se presentaron efectos de la densidad sobre la biomasa de la planta. El peso seco de las raíces se redujo conforme al aumento de la DA y fue menos marcado su efecto en comparación con la parte aérea, la cual exhibió una tendencia de tipo cuadrático, donde el menor valor se obtuvo con la DA más elevada (0,80g.cm<sup>-3</sup>). El hecho de que en esta unidad, el incremento de la compactación no haya afectado la biomasa de las raíces en la misma magnitud que en la unidad San Simón puede deberse a la capa-

dad que tienen los suelos derivados de cenizas volcánicas para hincharse y ganar volumen al ser humedecidos.

Lo anterior coincide con resultados obtenidos por algunos autores como Atwell (3), quien afirma que cuando las raíces son sometidas a elevadas resistencias mecánicas, reducen su tasa de elongación e incrementan su diámetro, se deforman (17) y tienden a crecer horizontalmente (33). Resultados similares encontró Salamanca (27), con plántulas de *Desmodium ovalifolium* establecidas en suelos de la unidad Chinchiná cuando aumentó su DA.



**Figura 4.** Valores promedio de peso seco de las raíces (P.S. Raíces) y de la parte aérea (P.S.P. Aérea), para plantas de café establecidas en dos unidades de suelos con diferentes DA..

Dado que el efecto de la compactación del suelo es más acentuado en suelos arcillosos, debido a la disminución del tamaño de los poros y el aumento de la resistencia a la penetración, a una misma densidad, las raíces penetran más fácilmente en suelos arenosos que arcillosos. Esto hace que los valores críticos de DA para el crecimiento de raíces varíen entre 1,45g.cm<sup>-3</sup> en arcillas y 1,85g.cm<sup>-3</sup> en arenas y limos, y su efecto sea más pronunciado en suelos secos y duros que en suelos húmedos (8).

Con los resultados de este trabajo se puede afirmar que, en suelos de la unidad Chinchiná la DA óptima para el desarrollo del café en la etapa vegetativa temprana está entre 0,64 y 0,67 g.cm<sup>-3</sup> (valores cercanos a los registrados en campo), mientras que para la unidad San Simón los mejores resultados se obtienen con densidades cercanas a 1,20g.cm<sup>-3</sup>. De igual manera, los resultados de altura y biomasa obtenidos con valores medios de DA en la unidad Chinchiná, indican que para lograr un buen crecimiento de las plantas de café en el campo, estos suelos deben manejarse con prácticas culturales que minimicen los riesgos de compactación o suelo muy suelto; mientras que para la unidad San Simón los mayores valores obtenidos con la menor DA indican que el manejo de estos suelos debe orientarse a reducir en algún grado su DA, lo cual puede lograrse mediante la aplicación de compuestos orgánicos, entre otras prácticas.

A nivel general, al comparar el crecimiento de las plantas entre las dos unidades de suelo,

cuyos valores promedio de DA son muy contrastantes (0,69 y 1,38 g.cm<sup>-3</sup>), se observa que a pesar de superar la densidad en la unidad San Simón dos veces la de Chinchiná, la altura de las plantas y la producción de biomasa total, fueron similares. Sin embargo, en San Simón se obtuvieron mayores valores de peso seco de las raíces, los cuales se asocian a que las partículas grandes de granito originan una mayor proporción de macroporos, donde las raíces crecen mejor. Por lo anterior, el crecimiento del café no solo es afectado por la DA como tal, sino también por otras características como la humedad y la porosidad, unidas al material parental y la fertilidad natural del suelo, aun en las mismas condiciones ambientales.

#### **Efecto de la DA sobre la absorción de nutrientes.**

Los contenidos foliares de nutrientes evaluados en plantas de café, para las dos unidades de suelo se presentan en la Tabla 4. En San Simón, los mayores contenidos de Ca y Fe, están asociados con su fertilidad natural proveniente de la meteorización de minerales ferromagnésianos (biotita), mientras que la mayor absorción de Mn, Cu y B en la unidad Chinchiná, se relaciona con los niveles de pH y materia orgánica. Según Fageria *et al.* (13) y Loué (21), estos factores (riqueza mineral, pH y MO) juegan un papel importante tanto en la disponibilidad de los elementos en el suelo como en la nutrición de las plantas.

La DA afectó principalmente la concentración de Ca, Mg y Cu en Chinchiná y P, Mn, Cu y B en San Simón; efectos que pudieron

**Tabla 4.** Promedios y coeficientes de variación de los contenidos foliares de nutrientes en café, para dos unidades de suelo.

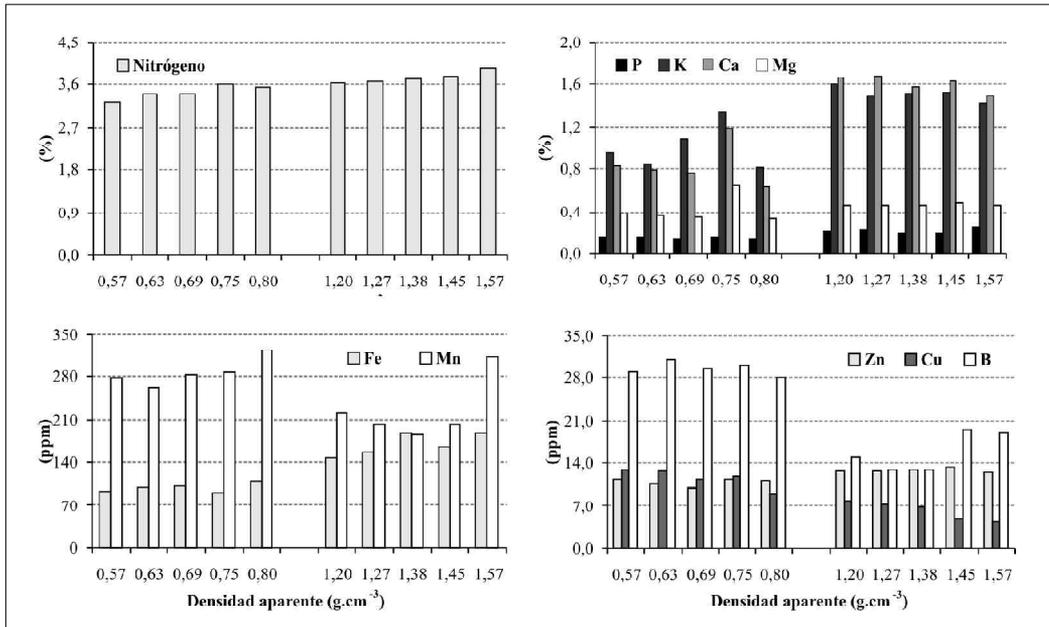
Unidad de suelo		N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B
		(% )						(ppm)			
Chinchiná	Prom.	3,44	0,14	1,00	0,83	0,40	97,85	287,23	10,82	11,54	29,56
	CV(%)	9,94	16,80	42,81	32,34	36,63	23,42	16,44	14,04	19,57	16,40
San Simón	Prom.	3,76	0,21	1,51	1,61	0,46	169,55	225,63	12,80	6,20	15,93
	CV(%)	7,03	18,85	11,34	11,03	9,72	26,58	36,33	11,08	28,34	26,00

estar influenciados por los factores antes mencionados, además de la humedad y la porosidad del suelo. En las dos unidades se observó una tendencia a incrementarse el nitrógeno foliar conforme aumentó la DA (Figura 5). Al respecto, Atwell (3) reporta un aumento en la concentración de azúcares y aminoácidos cerca de los ápices de las raíces de trigo y Boeuf-Tremblay *et al.* (7), reportaron una mayor exudación de compuestos nitrogenados en plantas de maíz, sometidas a compactación en condiciones de laboratorio.

Tardieu *et al.* (32) aseguran que las respuestas de las plantas al aumento de la DA del suelo estarían gobernadas por la acción simultánea de múltiples señales físicas y químicas como: a) el proceso mecánico de resis-

tencia en oposición a la presión de turgencia de las raíces; b) un mensaje que involucra al etileno y causa engrosamiento de las raíces en respuesta a la resistencia mecánica; c) una señal que involucra la hormona ABA (ácido abscísico) e induce el cierre de estomas en respuesta a la aglomeración de raíces y ayuda a conservar agua del suelo, aun con altos contenidos de humedad y d) otro mensaje químico, consistente en una acumulación de azúcares en los tejidos de la planta, que causa una reducción en la tasa de fotosíntesis.

Las diferencias encontradas en los contenidos foliares de Mn y B en la unidad San Simón y Cu en las dos unidades de suelo, también pueden relacionarse con los siguientes factores:



**Figura 5.** Concentración foliar de nutrientes en las plantas de café desarrolladas bajo diferentes DA en dos unidades de suelo.

a) El exceso de humedad y la poca aireación del suelo a pH bajo favorecen la reducción y acumulación del Mn disponible para las plantas (24).

Existe una relación directa entre el contenido materia orgánica y el aporte de B a pH bajo; sin embargo al reducirse la humedad del suelo disminuye la disponibilidad de este elemento (38). En los suelos arenosos, como es el caso de la unidad San Simón, el B es fácilmente lavado y se acentúa su carencia (21).

b) La absorción de un elemento puede reducir la de otro. Por ejemplo, el Fe compite con el Cu y este con el Zn por los sitios de absorción de la raíz, mientras que Fe y Mn compiten a nivel de la actividad enzimática (21).

En algunas ocasiones la DA se utiliza para estimar la cantidad de elementos en el suelo; incluso, para calcular los requerimientos de fertilización sin tener en cuenta que la nutrición también se ve afectada por otras características físicas que influyen sobre la relación suelo-aire-agua-planta. Con este estudio se corrobora la importancia que tiene la DA y su relación con las demás propiedades físicas del suelo sobre el crecimiento y desarrollo de la planta de café, independiente del contenido de nutrientes. Por tanto, se debe tener cuidado en la interpretación de esta propiedad y no emplearla en la determinación de los requerimientos de fertilizante.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a Cenicafé, COLCIENCIAS y a todas aquellas personas que hicieron posible la realización de este trabajo, especialmente al Dr. Celso Arboleda, a la Dra. Esther C. Montoya a la Sra. Beatriz Mejía, al Sr. Enrique Chanchí y al personal de la Estación Central Naranjal y la Dis-

ciplina de Suelos de Cenicafé. Por su colaboración.

### LITERATURA CITADA

1. AMÉZQUITA, E. Las propiedades físicas y el manejo productivo de los suelos. *In*: GARCÍA, A.; VALENZUELA, I. (Eds.). Manejo productivo de suelos para cultivos de alto rendimiento. Palmira, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, 2001. p. 11-30.
2. ARCILA, J. Factores que limitan el desarrollo de las raíces del café. *Avances Técnicos Cenicafé* No. 176:1-8. 1992.
3. ATWELL, B.J. The effect of soil compaction on wheat during early tillering. I. Growth, development and root structure. *New Phytologist* 115:29-35. 1990.
4. BARBER, S.A. Soil nutrient bioavailability; a mechanistic approach. New York, John Wiley and Sons, 1984. 398 p.
5. BERTOL, I.; CIPRANDI, O.; GOMES de C., L.N.; BATISTELA, O. Propiedades físicas e químicas e produtividade de milho afetadas pelo manejo do solo com tração animal, numa terra bruna estruturada. *Ciência Rural* 30:971-976. 2000.
6. BLOMME, G.; SWENNEN, R.; TENKOUANO, A. The effect of soil bulk density on root and overall plant development in six banana varieties. *Infomusa* 11:38-40. 2002.
7. BOEUF T., V.; PLANTUREUX, S.; GUCKERT, A. Influence of mechanical impedance on root exudation of maize seedlings at two development stages. *Plant and Soil* 172:279-287. 1995.
8. BRADY, N.C.; WEIL, R.R. The nature and properties of soils. New Jersey, Prentice-Hall, 1999. 881 p.
9. CASSEL, D.K. Tillage effects on soil bulk density and mechanical impedance. *In*: UNGER, P.W.; DOREN JR., D.M. VAN (Eds.). Predicting tillage effects on soil physical properties and processes. Madison, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, 1982. p. 45-67. (ASA Special Publication No. 44).

10. CLARK, L.J.; WHALLEY, W.R.; BARRACLOUGH, P.B. How do roots penetrate strong soil?. *Plant and Soil* 255: 93-104. 2003.
11. CULLEY, L.B. Density and compressibility. *In: CARTER, M. (Ed.) Soil sampling and methods of analysis*. Boca Raton, Lewis Publishers, 1993. p. 529-539.
12. ERBACH, D. Measurement of soil bulk density and moisture. *Transactions of the ASAE* 30:922-931. 1987.
13. FAGERIA, N.K.; BALIGAR, B.C.; CLARK, R.B. Micronutrients in crop production. *Advances in Agronomy* 77:185-268. 2002.
14. GUERRERO, R. La recomendación de fertilizantes, fundamentos y aplicaciones. *In: SILVA M., F. Ed. Fertilidad de suelos, diagnóstico y control*. Bogotá, SCCS, 1988. p. 235-277.
15. GUIMARAES, C.M.; STONE, L.F.; MOREIRA, A.A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. II. Efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 6: 213-218. 2002.
16. JONES, C. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. *Soil Science Society American Journal* 47:1208-1211. 1983.
17. KIRKEGAARD, J.A.; TROEDSON, R.J.; SO, H.B.; KUSHWAHA, B.L. The effect of compaction on the growth of pigeon pea on clay soils. II. Mechanisms of crop response and seasonal effects on an oxisol in a humid coastal environment. *Soil and Tillage Research* 24:129-147. 1992.
18. KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um latossolo vermelho, sob diferentes sistemas de uso y manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 26: 857-67. 2002.
19. KOOISTRA, M.J.; SCHOONDERBEEK, D.; BOONE, F.R.; VEEN, B.W.; NOORDWIJK, M. VAN Root-soil contact of maize, as measured by a thin-section technique. II. Effects of soil compaction. *Plan and Soil* 139: 119-129. 1992.
20. LIPIEC, J.; HAKANSSON, I.; TARKIEWICZ, S.; KOSSOWSKI, J. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. *Soil and Tillage Research* 19: 307-317. 1991.
21. LOUÉ, A. Los microelementos en agricultura. Madrid, Ediciones Mundi-Prensa, 1988. 354 p.
22. MAURYA, P.R.; LAL, R. Effects of bulk density and soil moisture on radicle elongation of some tropical crops. *In: LAL, R.; GREENLAND, D.J. (Eds.) Soil physical properties and crop production in the tropical soils*. Chichester, John Wiley & Sons, 1979. p. 339-347.
23. MONTENEGRO, H.; MALAGÓN, D. Propiedades físicas de los suelos. Bogotá, IGAC, 1990. 813 p.
24. MORAGHAN, J.T.; MASCAGNI, H.J., JR. Environmental and soil factors affecting micronutrient deficiencies and toxicities. *In: MORTVEDT, J.J.; COX, F.R.; SHUMAN, L.M.; WELCH, R.M. (Eds.) Micronutrients in agriculture*. Madison, Soil Science Society of America, 1991. p. 371-425. (SSSA Book Series No. 4).
25. PASSIOURA, J.B. Soil conditions and plant growth. *Plant Cell and Environment* 25: 311-318. 2002.
26. RODRÍGUEZ, V.R. DA ; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Comparação entre os metodos do cilindro e do terrão na determinação da porosidade e da densidade do solo. *Ciência Rural* 30:1065-1068. 2000.
27. SALAMANCA, A. Influencia de las características físicas del suelo y de su interacción con las condiciones climáticas en el comportamiento y calidad del *Desmodium heterocarpon* subsp. *ovalifolium* (Ohashi) en tres regiones de Colombia. Palmira, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias, 2000. 174 p. (Tesis: Ingeniero Agrónomo).
28. SATO, T.; YAMAWAKI, K.; NAKANO, M. Effects of dry bulk density, soil water content and hardness of volcanic ash soil on the growth pressure of soybean taproot. *Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 72: 175-179. 2001.
29. SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L.; CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 10: 91-95. 1986.

30. SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. VAN Soil compaction problems in world agriculture. *In*: SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. VAN (Eds.). Soil compaction in crop production. The Hague, Elsevier Science, 1994. p. 1-21.
31. STIRZAKER, R.J.; PASSIOURA, J.B.; WILMS, Y. Soil structure and plant growth: Impact of bulk density and biopores. *Plant and Soil* 185: 151-162. 1996.
32. TARDIEU, F.; ZHANG, J.; DAVIES, W.J. What information is conveyed by an ABA signal from maize roots in drying field soil?. *Plant Cell and Environment*. 15:185-191. 1992.
33. TAYLOR, H.M.; BURNETT, E. Influence of soil strength on the root-growth habits of plants. *Soil Science* 98:174-180. 1964.
34. TUBEILEH, A.; GROLEAU R., V.; PLANTUREUX, S.; GUCKERT, A. Effect of soil compaction on photosynthesis and carbon partitioning within a maize-soil system. *Soil and Tillage Research* 71:151-161. 2003.
35. VALENCIA, G. Manual de nutrición y fertilización del café. Quito, INPOFOS, 1998. 61 p.
36. VOORHEES, W.B. Wheel - induced soil physical limitations to root growth. *Advances in Soil Science* 19:73-95. 1992.
37. WILD, A. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Madrid, Mundi-prensa, 1992. 1045 p.
38. YERMIYAHU, U.; KEREN, R.; CHEN, Y. Boron sorption by soil in the presence of composted organic matter. *Soil Science Society American Journal*. 59:405-409. 1995.