

Análisis multivariado del comportamiento espacial y temporal de la resistencia del suelo a la penetración

Multivariate analysis of spatial and temporal behaviour of soil penetration resistance

César A. Cortés¹, Jesús H. Camacho-Tamayo², Fabio R. Leiva³

¹Coordinador Programa Aqua Crop. Representación FAO en Colombia., ²Profesor Asistente. Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional de Colombia. ³Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia/Bogotá. Autor para correspondencia: frleivab@unal.edu.co

Rec.: 29.11.12 Acep.: 10.12.13

Resumen

La resistencia a la penetración (RP) es una forma fácil y rápida de identificar la compactación del suelo. El objetivo del presente trabajo fue evaluar un procedimiento para caracterizar adecuadamente la variabilidad vertical y horizontal de la compactación de suelos agrícolas, usando técnicas de análisis multivariado. Las mediciones de RP se realizaron antes de la labranza y después de la cosecha en un lote sembrado con maíz (*Zea mays*) en la sabana de Bogotá (Colombia), en una cuadrícula regular de 32 puntos (25 m x 25 m), hasta una profundidad de 60 cm. Para identificar zonas y capas compactas del suelo se utilizaron técnicas de análisis multivariado. El análisis jerárquico, realizado a partir de las lecturas de RP por punto de muestreo, permitió elaborar mapas de contorno con zonas delimitadas de compactación. A su vez, cuando el análisis se realizó por profundidad utilizando la metodología de componentes principales, se identificaron tres capas de suelo donde la capa intermedia presentó los mayores valores de resistencia a la penetración en ambos muestreos. El procedimiento utilizado permitió caracterizar las variabilidades vertical y horizontal de la RP en el lote del estudio.

Palabras clave: Análisis de componentes principales, análisis jerárquico, Andisol, compactación, suelo.

Abstract

The study of agricultural soil compaction is of great relevance, due to its negative effects on crop development and productivity. A quickly and easy way to identify soil compaction is throughout penetration resistance (PR). The aim of this study was to define an approach to adequately characterize the vertical and horizontal variability of agricultural soil compaction, using multivariate analysis techniques. Soil penetration resistance was measured before tillage and after crop harvesting a field grown with maize (*Zea mays*), using a 32 point regular grid (25 m X 25 m), up to 60 cm of depth. To identify compacted areas and layers, multivariate analysis techniques were used. The hierarchical cluster analysis, considering the RP measurements by sampling point, allowed drawing contour maps with defined compacted areas. Meanwhile, when such an analysis was performed by depth, together with the principal component analysis, three soil layers were identified being the middle layer the one with the highest values of PR in both sampling periods. The approach performed, allowed characterizing the vertical and horizontal variability of PR in the field under study.

Key words: Andisol, cluster analysis, compaction, principal component analysis, soil.

Introducción

La compactación es una condición de suelos agrícolas que limita el desarrollo y la productividad de los cultivos (Soane *et al.*, 1981; Boivin *et al.*, 2006; Medina *et al.*, 2012) y tiene implicaciones ambientales (Soane y Ouwkerk, 1994). El fenómeno ocurre cuando la presión aplicada en el suelo reduce su porosidad (Lipiec *et al.*, 2003), lo que depende del contenido de agua en el suelo al momento de ejercer la presión, del tipo y tiempo de carga y de factores climáticos y características del suelo (Cucunubá-Melo *et al.*, 2011). Dependiendo del tipo de carga, el fenómeno puede ocurrir por efecto del tránsito de maquinaria agrícola, el pastoreo o por condiciones naturales (Bowen, 1981).

La resistencia mecánica del suelo es un indicador de compactación y para su medición se usan penetrómetros y penetrógrafos (Utset y Cid, 2001) que miden la fuerza necesaria para hincar un cono estándar en el suelo. La resistencia a la penetración (RP) es una medida indirecta de la fuerza que requieren las raíces para penetrar los poros o los canales existentes en el suelo, o para deformar la estructura de éste y avanzar en el medio poroso con el fin de brindar soporte y absorber nutrientes y agua para el adecuado desarrollo de los cultivos (Medina *et al.*, 2012).

Normalmente, la RP se determina buscando valores o perfiles promedio en un lote, no obstante este procedimiento no reconoce que la RP presenta variaciones espacial (horizontal y vertical) y temporal, debido a procesos naturales del suelo y al manejo del mismo. Por esta razón, para su estimación en forma precisa se requiere un número considerable de mediciones en diferentes sitios y profundidades del lote, acompañadas de análisis espaciales posteriores (Medina *et al.*, 2012).

Existen diferentes técnicas para el estudio de la RP, entre las que se encuentran el análisis univariado, la geoestadística y el análisis multivariado. El análisis univariado permite evaluar su comportamiento promedio en un área determinada. La geoestadística permite visualizar el comportamiento espacial, particularmente por capas (profundidades), lo que implica un proceso largo y en ocasiones con resultados espacia-

les similares entre profundidades, no obstante permite identificar claramente capas y zonas con problemas de compactación, lo cual facilita el manejo localizado (Ramírez-López *et al.*, 2008). Por su parte, la estadística multivariada permite la agrupación de datos en pocos intervalos significativos, a través de análisis de componentes principales (ACP) y de agrupamiento jerárquico (AAJ), lo cual facilita la identificación de correlaciones de la RPa a diferentes profundidades o entre puntos muestreados en el espacio, eliminando, así, la redundancia resultante del análisis de los datos por separado (Stelluti *et al.*, 1997; Orjuela-Matta *et al.*, 2012). Por la facilidad para incluir conjuntamente un alto número de variables, estos métodos multivariados son aplicados para clasificar, modelar y evaluar resultados de estudios ambientales y de producción agrícola (Ramos *et al.*, 2007).

El ACP es una técnica multivariada que utiliza combinaciones lineales para reducir la dimensionalidad de los datos, transformando las variables originales en un conjunto de variables no correlacionadas entre sí, que se denominan componentes principales (Ramos *et al.*, 2007). El primer componente se encuentra asociado con el auto-valor mayor y tiene la mayor varianza; el segundo explica la mayor varianza no explicada por el primer componente y así sucesivamente para los demás componentes. Es conveniente que un número pequeño de componentes explique gran porcentaje de la varianza total, lo cual indica que el conjunto de datos es descrito en un espacio dimensional menor (Ferreira, 2011). De otro lado, el AAJ busca dividir un conjunto de datos en grupos, de forma que las variables del mismo grupo sean similares entre sí y diferentes de los otros grupos. El AAJ tiende a combinar agrupaciones que presentan varianzas bajas y pueden producir agrupaciones que tienen varianzas iguales (Ferreira, 2011). En este contexto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar un procedimiento para caracterizar adecuadamente las variabilidades espacial (vertical y horizontal) y temporal de la compactación de suelos agrícolas en la sabana de Bogotá, Colombia.

Materiales y métodos

El estudio se realizó entre abril de 2006 y enero de 2007 en un lote semicomercial de maíz (*Zea mays*) localizado en un Andisol, donde se tomaron datos espaciales de RP antes de la labranza (S1) y después de la cosecha (S2). El lote se encuentra localizado en el municipio de Mosquera (Cundinamarca) a 4° 42' 00" N y 74° 12' 59" O, a 2550 m.s.n.m. La zona presenta una temperatura, promedio anual, de 12.6 °C y un régimen bimodal de lluvias, concentradas entre marzo y junio y octubre y diciembre, con precipitación media anual de 670 mm. El lote tiene topografía plana (pendiente < 1%), pertenece a la serie Marengo, con texturas franco limosas y franco arcillosas, de estructuras subangular fina y media moderada. El horizonte A es espeso y oscuro, originado por sedimentos lacustres con aspersiones de cenizas volcánicas y aportes de arcillas aluviales (Malagón, 2003), presentando un drenaje natural entre pobre e imperfecto.

El lote del estudio ha estado dedicado a cultivos transitorios (maíz, arveja y hortalizas) manejados con labranza convencional e implementos de discos y arado rotatorio. Durante el periodo del ensayo se encontraba sembrado en maíz (*Zea mays*). La primera medición *in situ* de RP se realizó previamente a las labores de labranza del suelo (S1) y la segunda, después de la cosecha de maíz (S2). Las labores de labranza realizadas consistieron en un pase de arado de cincel a una profundidad de 30 cm y dos pases de rastra a una profundidad de 0.22 m. Entre la primera y la segunda medición de RP se presentó una precipitación acumulada de 690 mm. Se debe señalar que 2006 fue un año declarado oficialmente por el Centro de Predicción Climática con varios meses típicos del fenómeno de La Niña, con una precipitación anual acumulada de 860 mm para la zona de estudio.

Para el muestreo se diseñó una grilla regular de 32 puntos, con distancias de 25 m x 25 m. Para la obtención de los datos de RP se utilizó un penetrógrafo con cono estándar de 30° y 12.83 mm de diámetro marca Eijkelkamp -modelo P1.51, con el cual se hicieron tres mediciones por sitio hasta 60

cm de profundidad en el suelo. Para generar la base de datos se tomaron los valores promedio de la RP de las tres mediciones realizadas por punto de muestreo, tomando valores de RP cada 0.05 m, con lo cual se obtuvieron 12 valores; además se tomó el valor a 1 cm para la primera capa de suelo con el fin de obtener la RP superficial. El contenido promedio de agua en el suelo, evaluado por el método gravimétrico, en los primeros 30 cm de profundidad fue de 36.04 ± 4.30% para el primer muestreo y de 36.43 ± 6.27% para el segundo.

Los datos de RP inicialmente fueron analizados mediante estadísticas descriptivas: media, desviación estándar, valores máximo y mínimo y el coeficiente de variación (CV), con el fin de identificar el comportamiento general de los datos para cada profundidad. Para el análisis del CV se tuvo en cuenta la clasificación de Warrick y Nielsen (1980), con variabilidad baja para valores < 12%, variabilidad media entre 12 y 60% y variabilidad alta para valores > 60%. Posteriormente, se aplicó estadística multivariada para identificar el comportamiento por profundidad y por punto de la RP, mediante el análisis de agrupamiento jerárquico (AAJ) y de componentes principales (ACP). En el AAJ se formaron agrupaciones por profundidad y por punto para establecer la presencia de capas y zonas compactas, utilizando la distancia euclidiana para separar los grupos identificados en los dendogramas respectivos. Los resultados fueron obtenidos utilizando el algoritmo Ward, que calcula la distancia a través de la suma de los cuadrados entre dos grupos. Finalmente se realizó el ACP para las diferentes profundidades, usando la rotación de Varimax.

Los análisis estadísticos fueron realizados utilizando el programa SPSS versión 17. Para mejorar la comprensión de los grupos formados y corroborar el comportamiento espacial, se realizaron mapas de contorno por medio de interpolación inversa de la distancia ponderada (IDW) con el software ArcMAP, versión 9.3. También se analizaron las curvas del comportamiento de la RP en el perfil del suelo, con el fin de corroborar los resultados del AAJ.

Resultados y discusión

Análisis descriptivos

Los valores promedios de RP en S1 (antes de la preparación del terreno) fueron < 2 MPa (Cuadro 1), lo cual sugiere que la compactación no es restrictiva para el crecimiento de las raíces de cultivos (Soane *et al.*, 1981, Veronese Jr. *et al.*, 2006; Otto *et al.*, 2011). No obstante, se encontraron valores puntuales considerablemente altos, incluso > 4 MPa, que muestran que el promedio por sí solo no resulta adecuado para describir la compactación en ese suelo.

En la segunda evaluación (después de la cosecha) los valores promedios de RP (S2) superaron 2 MPa, excepto para los primeros 0.01 m, mostrando que a través del tiempo la combinación de factores como preparación del suelo y tránsito de maquinaria, así como las condiciones edafoclimáticas, favorecieron aumentos en la resistencia mecánica del suelo que pueden restringir el crecimiento de las raíces de cultivos. En este caso, posiblemente, el uso intensivo de maquinaria para cultivo fue el factor que más afectó los valores de RP. Se sabe que el suelo tiende a revertir esta intervención antrópica y busca su estructura original mediante procesos naturales, situación que es influenciada por las precipitaciones y el riego durante el periodo de cultivo. En este proceso las partículas del suelo se reacomodan formando costras duras en periodos cortos y posteriores a la labranza, con fuerzas de cohesión superiores a las de las condiciones naturales, especialmente en suelos con altos contenidos de partículas finas (Soane *et al.*, 1981), tal como se observó en los suelos del presente estudio.

De acuerdo con Soane *et al.* (1981), Castignano *et al.* (2002) y Veronese Jr. *et al.* (2006) los valores iniciales (S1) de RP (< 0.02 MPa) en este estudio fueron adecuados para el cultivo de maíz, pero no los valores encontrados en la fase S2 (> 0.02 MPa). Tomando como referencia la propuesta de Warrick y Nielsen (1980) se observó una variabilidad media para la RP en la mayoría de las profundidades en el suelo, excepto en la primera capa, que presentó alta variabilidad, inclusive con valores de RP iguales a cero (0) (Cuadro

1). En la S1, los valores del CV disminuyeron entre 1 y 30 cm y aumentaron hasta la profundidad de 0.6 m, valores que coinciden con los encontrados por Veronese Jr. *et al.* (2006) y Medina *et al.* (2012). Este comportamiento probablemente fue debido al tránsito de maquinaria, que afecta principalmente las capas más superficiales, haciéndolas más heterogéneas; además, la labranza del suelo modifica la estructura y por tanto, la RP. En la S2 se observó una relación inversa entre el CV y la profundidad, siendo más alta la variabilidad en la capa superficial; en general, la menor dispersión de los valores del CV fueron afectados por los mayores valores de RP encontrados en este periodo.

Agrupamiento jerárquico

El AAJ permitió identificar sitios en el lote experimental, de acuerdo con la magnitud de la RP y diferenciar aquellos donde la RP es un limitante para el desarrollo de las raíces y la productividad de cultivos. En la S1, el AAJ presentó tres grupos definidos (Figura 1A), donde el grupo 1 está formado por los mayores valores de RP (2.6 MPa) (Figura 1B) –zonas inferior izquierda y superior derecha del lote– los que tuvieron mayor tránsito de maquinaria. El grupo 2 corresponde a zonas próximas al grupo 1, donde se observaron valores de RP entre 1.5 y 3 MPa, en uno o varios puntos de las profundidades analizadas, lo que indica la necesidad de ejecutar labores de labranza para reducir la compactación. El grupo 3 corresponde a sitios o zonas donde no se presentaron problemas de compactación para la época de muestreo y corresponde a una franja que cruza el lote desde la zona superior izquierda hasta la inferior derecha, con valores < 1.2 MPa en todas las profundidades analizadas.

En S2 se observa aumento en la RP en todas los sitios de muestreo cuando se comparan con los resultados obtenidos en S1, lo que indica un proceso de compactación ya que en ambas mediciones los contenidos de humedad en el suelo fueron similares. Se debe señalar que para el segundo muestreo (S2) en todo el lote se presentaron valores de compactación > 1.9 MPa como resultado de las labores de cultivo y el tránsito de maquinaria.

Cuadro 1. Estadística descriptiva de la resistencia a la penetración (MPa) del suelo a diferentes profundidades, en estados S1 y S2.

Profundidad (m)	Media (MPa)	D.E.	Mínimo (MPa)	Máximo (MPa)	CV (%)
Antes de la labranza (S1)					
0.01	0.65	0.58	0.00	2.20	88.25
0.05	1.05	0.67	0.10	2.70	64.18
0.10	1.53	0.71	0.30	3.10	46.28
0.15	1.73	0.76	0.30	4.10	44.00
0.20	1.78	0.72	0.60	4.00	40.57
0.25	1.73	0.57	0.90	3.20	32.71
0.30	1.74	0.54	1.10	3.10	31.02
0.35	1.74	0.55	1.10	3.00	31.68
0.40	1.78	0.67	0.80	3.70	37.89
0.45	1.78	0.72	0.80	3.70	40.58
0.50	1.76	0.76	0.70	3.70	43.40
0.55	1.71	0.75	0.70	3.80	44.09
0.60	1.68	0.76	0.50	3.80	45.58
Después de la cosecha (S2)					
0.01	0.69	0.98	0.00	4.20	143.13
0.05	2.14	0.97	0.40	4.30	45.18
0.10	2.72	1.05	1.00	4.70	38.64
0.15	2.96	1.09	1.20	4.90	36.97
0.20	2.96	1.00	1.40	4.80	33.67
0.25	2.90	1.03	1.30	4.60	35.50
0.30	2.77	0.95	1.20	4.30	34.49
0.35	2.66	0.82	1.10	4.20	30.98
0.40	2.72	0.75	1.10	4.20	27.66
0.45	2.70	0.71	1.40	4.20	26.34
0.50	2.75	0.73	1.50	4.20	26.46
0.55	2.77	0.70	1.70	4.40	25.28
0.60	2.70	0.69	1.50	4.20	25.72

D.E. = Desviación estándar. CV = Coeficiente de variación.

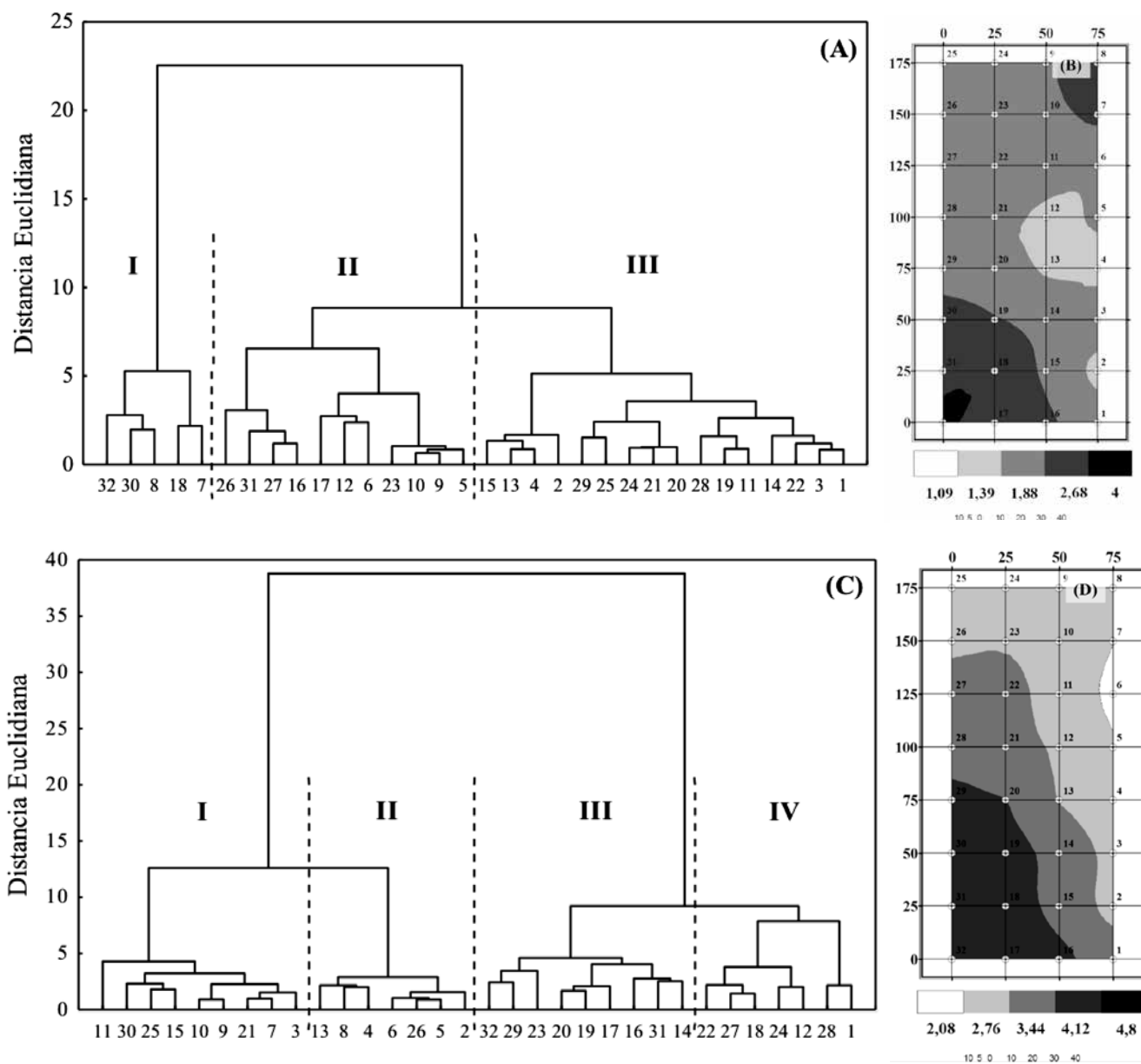


Figura 1. Dendrogramas de agrupamiento jerárquico por puntos de muestreo del suelo antes de la labranza (A) y después de la cosecha (C), con sus respectivos mapas de contorno (B y D).

Las distribuciones espaciales de la RP en S1 y S2 mostraron una correlación directa y significativa ($R^2 = 0.47$) entre ambas épocas de muestreo para las diferentes profundidades. Cuando dicha correlación fue calculada considerando las diferentes profundidades en cada sitio de muestreo, esta tendencia se mantuvo en la mayor parte del área con correlaciones variables entre $R^2 = 0.34$ y 0.92 , donde los menores valores (no significativos) correspondieron a la transición

entre sitios de menor a mayor valor de la RP siendo, inclusive, inversa en la parte superior izquierda, área que corresponde a la zona de ingreso al lote.

El dendrograma para los datos en S2 presentó cuatro grupos definidos (Figura 1C), donde los grupos I y II presentaron los valores más bajos de RP, correspondiente a la franja derecha del lote y a una pequeña zona en la parte superior izquierda. En S1 y S2, el AAJ por profundidad presentó tres

grupos (Figuras 2A y 3A) que también aparecen en el ACP (Figuras 2C y 3C), lo que muestra una tendencia clara de la RP en el perfil del suelo a profundidades entre 0 y 10 cm con los menores valores de RP (Grupo I); 10 - 35 cm con los valores más altos (Grupo II); y profundidades > 60 cm donde la RP tendió a disminuir (Grupo III). Estos grupos representan la curva típica de la RP en suelos agrícolas y confirman un comportamiento diferenciado para cada profundidad (Werich-Neto *et al.*, 2006).

Hasta 10 cm de profundidad la RP en la mayoría de los puntos fue < 1.5 MPa en S1 y de 2.5 MPa en S2, no obstante en algunos casos este valor fue más alto debido al tránsito de maquinaria y al acomodamiento de las

partículas que ocurre después de la labranza. Entre 10 y 35 cm de profundidad el suelo evidencia el uso intensivo de maquinaria en las labores de labranza, que normalmente se realizan con una frecuencia semestral. La reducción de la RP a profundidades mayores que 35 cm es común en diferentes tipos de suelos dedicados a la producción agrícola y su valor depende de las fluctuaciones del nivel freático, el cual en las condiciones de este estudio durante la época lluviosa puede alcanzar la superficie. Lo anterior pudo ser confirmado mediante la observación visual de una capa endurecida entre 20 y 30 cm de profundidad en el perfil, lo que se explica por la historia de manejo mecanizado del lote.

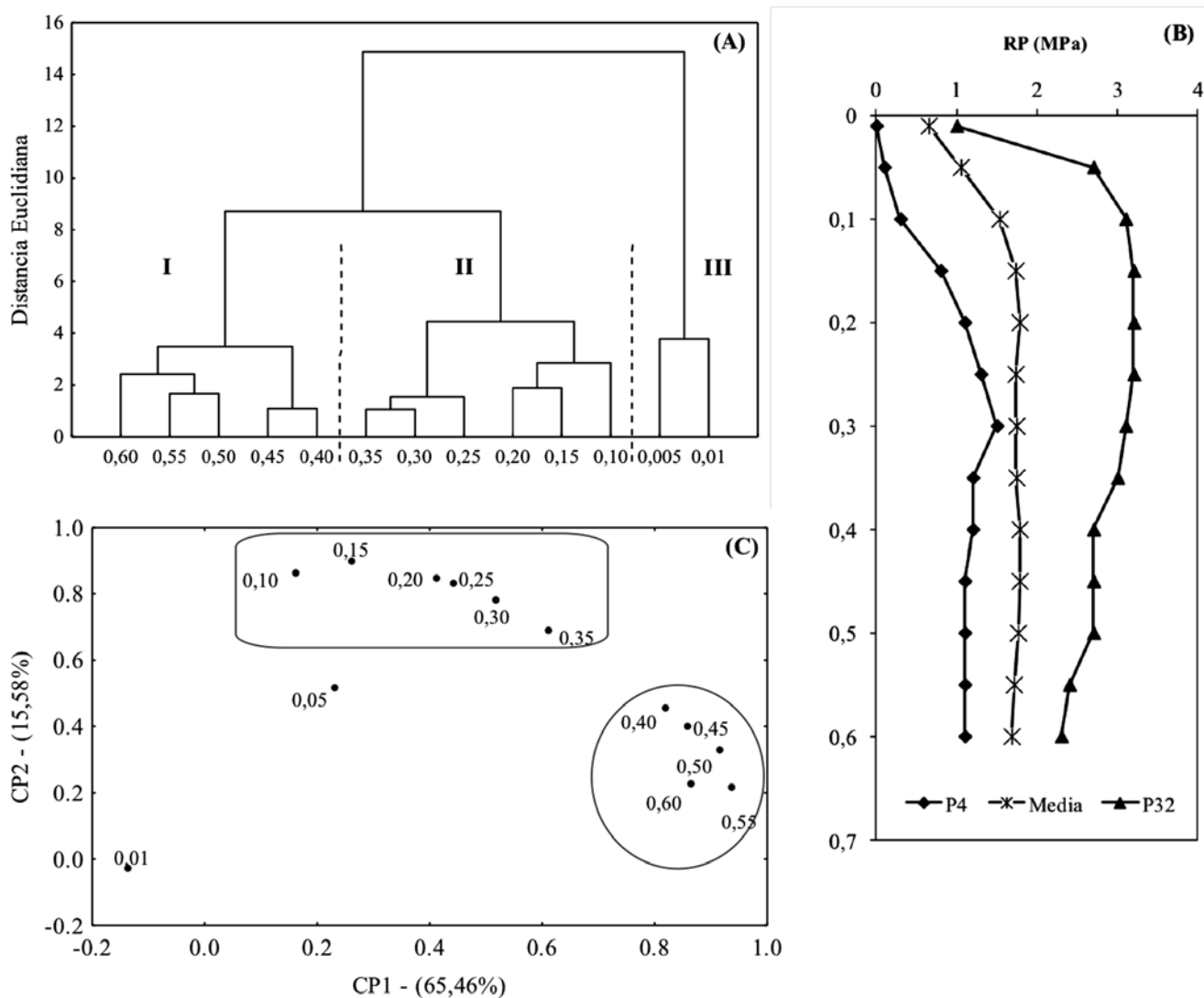


Figura 2. Comportamiento antes de la labranza de la resistencia a la penetración (RP) a diferentes profundidades en el suelo, a partir del análisis de agrupamiento jerárquico (A), curvas de RP (B) y del análisis de componentes principales (C).

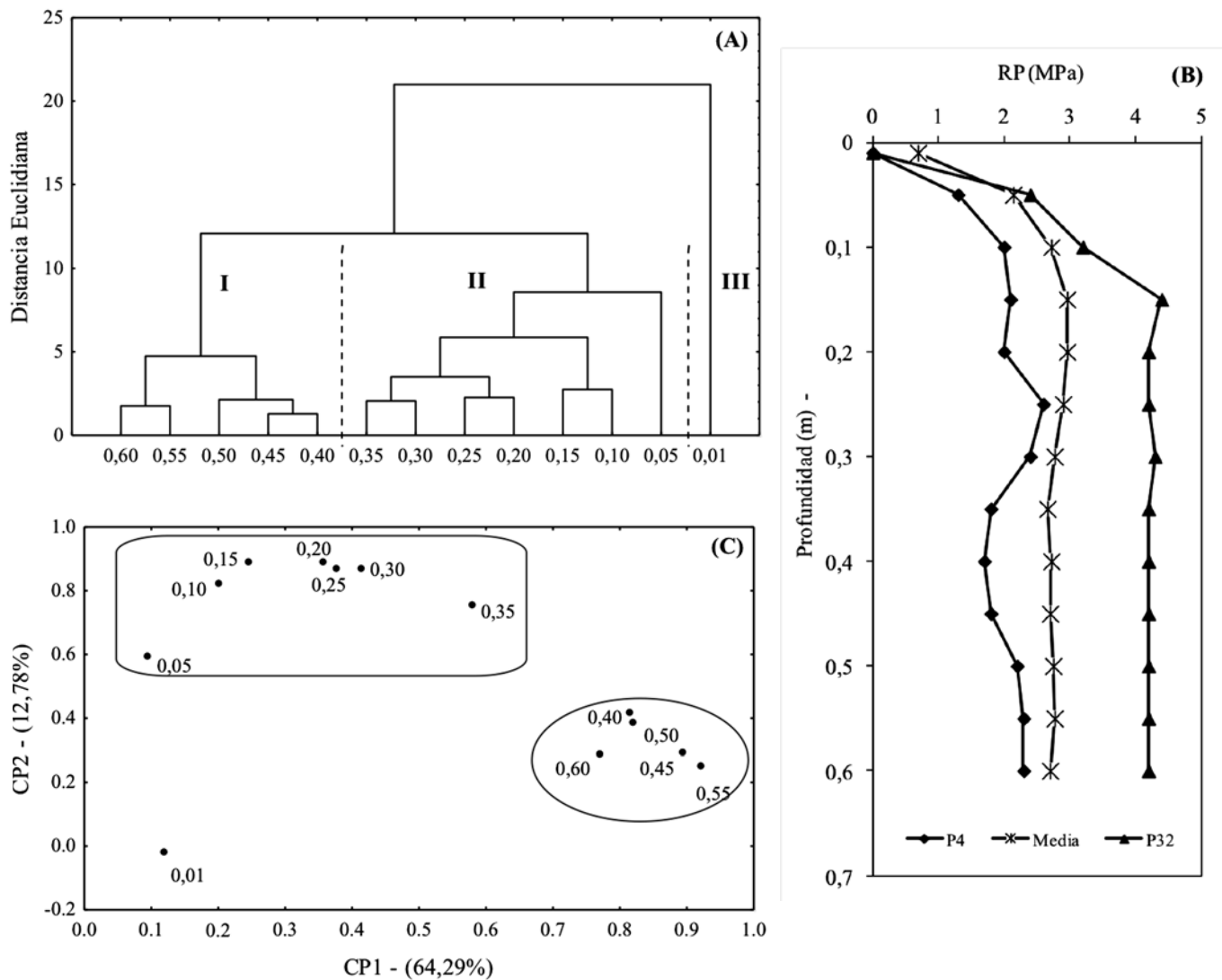


Figura 3. Comportamiento después de la cosecha de la resistencia a la penetración (RP) del suelo a diferentes profundidades, a partir del análisis de agrupamiento jerárquico (A), curvas de RP (B) y del análisis de componentes principales (C).

Análisis de componentes principales

El ACP para los valores de RP en las diferentes profundidades, tanto en la S1 como en la S2, relaciona los coeficientes de los tres primeros componentes, los cuales presentaron autovalores > 1.0 y constituyen un intervalo adecuado (Kaiser y Rice, 1974), ya que explican más del 85% de la varianza total (Cuadro 2). Los valores comunes y cercanos a 1 para la RP en las diferentes profundidades, demuestran la representatividad de los componentes analizados en el presente estudio. Por otra parte, los coeficientes para cada componente muestran una correlación positiva de la RP entre las diferentes profundidades y algún grado de

continuidad entre capas de suelo adyacentes, lo que coincide con los hallazgos de Stelluti *et al.* (1998) y Medina *et al.* (2012). De acuerdo con Soane *et al.* (1981) la presión ejercida en la superficie del suelo es transmitida a capas más profundas, disipando su efecto hasta una profundidad de 50 cm dependiendo de la textura, el contenido de agua en el suelo y de la presión de contacto.

El primer componente (CP1) representa cerca del 65% de la varianza total para ambas épocas de muestreo (S1 y S2) y confirma la presencia de una capa entre 40 y 60 cm de profundidad, donde los efectos de labranza y tráfico de maquinaria han tenido

Cuadro 2. Coeficientes de los tres primeros componentes (CP) de la resistencia a la penetración a diferentes profundidades, para S1 y S2.

Profundidad (cm)	CP1	CP2	CP3	Comunalidad
Antes de la labranza (S1)				
0.01	-0.13543	-0.02575	0.95855	0.93783
0.05	0.23011	0.51973	0.76153	0.90299
0.10	0.16087	0.86088	0.30758	0.86160
0.15	0.26158	0.89795	0.14308	0.89521
0.20	0.41083	0.84757	0.04560	0.88923
0.25	0.44362	0.83186	0.04493	0.89082
0.30	0.51866	0.78286	-0.08459	0.88904
0.35	0.61111	0.68841	0.04819	0.84969
0.40	0.81769	0.45453	0.07367	0.88064
0.45	0.85749	0.40210	0.16972	0.92579
0.50	0.91499	0.33080	0.03274	0.94772
0.55	0.93683	0.21656	-0.09774	0.93408
0.60	0.86452	0.22515	-0.09655	0.80741
Autovalor	8.51	2.02	1.08	
Var. (%)	65.46	15.58	8.29	
Var. Acum. (%)	65.46	81.04	89.33	
Después de la cosecha (S2)				
0.01	0.11798	-0.01606	0.92725	0.87396
0.05	0.09368	0.59399	0.65153	0.78609
0.10	0.20078	0.82452	0.39777	0.87836
0.15	0.24479	0.89004	0.22059	0.90075
0.20	0.35701	0.89011	0.05000	0.92225
0.25	0.37539	0.86916	-0.00914	0.89643
0.30	0.41377	0.87136	-0.06019	0.93410
0.35	0.57805	0.75500	-0.04858	0.90652
0.40	0.81349	0.41701	0.00236	0.83567
0.45	0.89333	0.29201	0.07464	0.88887
0.50	0.92188	0.25331	0.10425	0.92489
0.55	0.82043	0.38957	0.17180	0.85438
0.60	0.77101	0.28674	0.15167	0.69968
Autovalor	8.36	1.66	1.28	
Var. (%)	64.29	12.78	9.87	
Var. Acum. (%)	64.29	77.07	86.94	

poco efecto sobre el nivel freático ya que no se han utilizado equipos pesados (Werich-Neto *et al.*, 2006). El segundo componente (CP2) constituye el 15.58% para S1 y 12.78%

para S2 y está representado principalmente por la capa de suelo entre 0,10 y 0.30 m, la zona de transición entre los horizontes A y B de suelos de la zona de estudio, mostrando

además el efecto secundario de las labores de preparación del suelo. El tercer componente principal (CP3) representa menos del 10% de la varianza total para ambas épocas de muestreo y está relacionado con la capa superficial, donde se presentan los mayores procesos de reconsolidación, lo cual ocurre en los suelos agrícolas después de ser sometidos a fuerzas externas, así como a los factores climáticos propios de la zona.

Conclusiones

- El estudio mostró patrones espaciales similares de la RP para ambas épocas de muestreo, con puntos altamente correlacionados entre sí; no obstante, el manejo mecanizado del cultivo de maíz ocasionó incrementos en la RP que indican un proceso de compactación al finalizar el ciclo de cultivo.
- Mediante la metodología utilizada es posible identificar áreas y capas con diferencias en niveles de compactación, evidenciados en el análisis jerárquico y de componentes principales. Esto permite establecer zonas y profundidades de manejo para la realización de labores agrícolas por sitio específico.
- El procedimiento utilizado, basado en técnicas de análisis multivariado, permitió caracterizar adecuadamente las variabilidades vertical y horizontal de la RP en el lote del estudio.

Agradecimientos

Al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias) y a la Universidad Nacional de Colombia por la financiación del Proyecto de investigación Manejo Sostenible del Suelo en Cultivos Transitorios bajo la Concepción de Agricultura de Precisión.

Referencias

Boivin, P.; Schäffer, B.; Temgoua, E.; Gratier, M.; y Steiman, G. 2006. Assessment of soil compaction using soil shrinkage modelling: Experimental data and perspectives. *Soil Till. Res.* 88(1-2):65 - 79.

Bowen, H. 1981. Alleviating mechanical impedance. En: Arkin, C. E. y Taylor, H. M. (eds.). *Modifying*

the root environment to reduce crop stress. *Amer. Soc. Agric. Eng. Monograph* 4:24 - 57.

Castrignano, A.; Maiorana, M.; Fornaro, F.; y López, N. 2002. 3D spatial variability of soil strength and its change over time in a durum wheat field in Southern Italy. *Soil Till. Res.* 65(1):95 - 108.

Cucunubá-Melo, J. L.; Alvarez-Herrera, J. G.; y Camacho-Tamayo, J. H. 2011. Identification of agronomic management units based on physical attributes of soil. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 11(1):87 - 99.

Ferreira, D. F. 2011. *Estatística Multivariada*. Lavras. Ed. UFLA. 676 p.

Kaiser, H. F. y Rice, J. 1974. Little jiffy mark IV. *Educ. and Psych. Meas.* 34(1):111 - 117.

Lipiec, J.; Arvidsson, J.; y Murer, E. 2003. Review of modelling crop growth, movement of water and chemicals in relation to topsoil and subsoil compaction. *Soil Till. Res.* 73(1-2):15 - 29.

Malagón-Castro, D. 2003. Ensayo sobre tipología de suelos colombianos. Énfasis en génesis y aspectos ambientales. *Rev. Acad. Col. Cienc.* 27(104):319 - 341.

Medina, C.; Camacho-Tamayo, J. H.; y Cortes, C. A. 2012. Soil penetration resistance analysis by multivariate and geostatistical methods. *Eng. Agríc.* 32(1):91 - 101.

Orjuela-Matta, H. M.; Rubiano, Y.; y Camacho-Tamayo, J. H. 2012. Spatial analysis of infiltration in an Oxisol of the Eastern Plains of Colombia. *Chilean J. Agric. Res.* 72(3):404 - 410.

Otto, R.; Silva, A. P.; Franco, H. C.; Oliveira, E. C.; y Trivelin, P. C. 2011. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. *Soil Till. Res.* 117:201 - 210.

Ramírez-López, L. A.; Reina-Sánchez; y Camacho-Tamayo, J. H. 2008. Variabilidad espacial de atributos físicos de un Typic Haplustox de los Llanos Orientales de Colombia. *Eng. Agríc.* 28(1):55 - 63.

Ramos, M. C.; Colts-Folch, R.; y Martínez-Casasnovas, J. A. 2007. Effects of land terracing on soil properties in the Priorat región in Northeastern Spain: A multivariate analysis. *Geoderma* 142(3-4):251 - 261.

Soane, B. D.; Blackwell, P. S.; Dickson, J. W.; y Painter, D. J. 1981. Compaction by agricultural vehicles: a review. 1. Soil and wheel characteristics. *Soil Till. Res.* 1(1):207 - 237.

Soane, B. D. y Ouwerkerk, C. Van. 1994. Soil compaction problems in world agriculture. En: Soane, B. D. y Ouwerkerk, C. Van (eds.). *Soil compaction in crop production*. Elsevier, Amsterdam. p. 1 - 21.

Stelluti, M.; Maiorana, M.; y Giorgio, D. 1998. Multivariate approach to evaluate the penetrometer resistance in different tillage systems. *Soil Till. Res.* 46(3-4):145 - 151.

- Utset, A. y Cid, G. 2001. Soil penetrometer resistance spatial variability in a Ferralsol at several soil moisture conditions. *Soil Till. Res.* 61(3-4):193 - 202.
- Veronese Jr., V.; Carvalho, M. P.; Dafonte, J.; Freddi, O. S.; Vidal-Vásquez, E.; e Ingaramo, O. E. 2006. Spatial variability of soil water content and mechanical resistance of Brazilian Ferralsol. *Soil Till. Res.* 85(1-2):166 - 177.
- Warrick, A. y Nielsen, D. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. En: Hillel, D. (ed.). *Applications of soil physics*. New York. Academic Press. p. 319 - 344..
- Weirich-Neto, P. H.; Borgui, E.; Sverzut, C. B.; Mantovani, E. C.; Gomilde, R. L.; y Neues, W. L. 2006. Análise multivariada da resistência do solo à penetração sob plantio directo. *Ciênc. Rural* 36(4):1186 - 1196.