
ANÁLISIS DE COMPACTACIÓN EN SUELO FRANCO ARENOSO USANDO HERRAMIENTAS DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN EL CENTRO DE FORMACIÓN AGROINDUSTRIAL LA ANGOSTURA - CAMPOALEGRE, HUILA

Diego Leonardo Chávarro P.
Estudiante Ingeniería Agrícola
Universidad Surcolombiana

William Alexis Ochoa M.
Instructor Agrícola
Centro de Formación Agroindustrial La Angostura
Grupo de Investigación Agroindustrial La Angostura

Armando Torrente Trujillo
Profesor Titular Universidad Surcolombiana

Autores para correspondencia:
diechape@gmail.com; waochoa5@misena.edu.co

Resumen: A través del indicador resistencia mecánica a la penetración (R_p), se evaluaron zonas de compactación en suelo franco arenoso. Se usaron equipos y herramientas de sistemas de información geográfica relacionadas con la variabilidad espacial de suelos. El estudio se llevó a cabo en el Centro de Formación Agroindustrial La Angostura del SENA, ubicado en Campoalegre, Huila. Se realizaron pruebas de R_p con penetrómetro digital, GPS y barrenado *in situ* en 54 puntos de muestreo, en un lote de aproximadamente 6,5 hectáreas, la mayor parte de las cuales son cultivadas intensamente con cereales (arroz y maíz). La extensión GME (Geospatial Modelling Environment) y el software ArcGIS® fueron utilizados para el análisis y la obtención de los resultados de los datos con métodos geostatísticos de interpolación *kriging*, y para la ubicación de los puntos de muestreo ubicados posteriormente en campo por medio de un navegador GPS.

Palabras clave: Geostatísticos, *kriging*, variabilidad espacial.

COMPACTION ANALYSIS IN SANDY LOAM SOIL USING GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM TOOLS IN AGROINDUSTRIAL TRAINING CENTER LA ANGOSTURA - CAMPOALEGRE, HUILA

Abstract: By means of the penetration resistance (R_p) indicator, compaction zones were evaluated in the sandy loam soil. Equipment and tools of geographic information systems related to the spatial variability of soils were used. The study was carried out at La Angostura Agroindustrial Training Center of SENA located in Campoalegre - Huila. R_p tests with digital penetrometer, GPS and *in situ* drilling were carried out at 54 sampling points of approximately 6.5 hectares some of them cultivated intensely with cereals

Key words: Geostatistical, *kriging*, spatial variability.

(rice and maize). The GME (Geospatial Modeling Environment) extension and ArcGIS® software were used for the analysis and results of the data with interpolation geothermal methods and for the location of the sampling points located in the environment of a GPS navigator.

Introducción

El problema de la degradación de tierras agrícolas a nivel mundial requiere el desarrollo de nuevas tecnologías y sistemas de cultivo que conduzcan a una agricultura sostenible asentada en suelos igualmente sostenibles (Amezquita, 1998).

Muchas veces se ha hablado de la compactación de los suelos como uno de los mayores problemas de la agricultura. Estudios realizados durante años han relacionado este problema con diferentes tópicos de deficiente utilización de la tierra por parte del hombre o con una característica innata del suelo. La FAO (1990) indica que del total de 1475 millones de hectáreas que son utilizadas en agricultura (cultivos permanentes más cultivos anuales), 553 millones de hectáreas se encuentran degradadas por intervención humana, lo cual equivale a que cerca del 37% del área intervenida por el hombre tiene algún problema de degradación. A nivel del continente americano, en Norteamérica el 27% de las tierras dedicadas a la agricultura están degradadas, en Centroamérica el 74% y en Suramérica el 45% (Oldeman, 1994).

La agricultura tradicional no ha sido objeto de grandes transformaciones, normalmente el agricultor toma decisiones de manejo del suelo a partir de muestras que representan de manera general sus condiciones. Sin embargo, la variabilidad espacial de estas características ocasiona resultados igualmente variables. Por lo anterior, una preocupación que se presenta al productor agrícola es el manejo de variabilidad intra-parcelaria que surge como consecuencia a la diversidad de las propiedades de los suelos, agentes patógenos o microclimas que afectan de manera selectiva al conjunto parcelario. Para

dar respuesta a esta problemática ha surgido el término de la Agricultura de Precisión (AP), la cual toma en cuenta la existencia de la variabilidad con la que se trabaja en el campo sirviéndose del uso de las tecnologías, para estimar, evaluar y entender dichas variaciones (Fajardo, 2014). De esta forma, se aumenta la competitividad y productividad en el sector, se reducen los costos y se mejora la calidad para un manejo ambiental adecuado de los cultivos.

La compactación del suelo perjudica la fijación de las plantas, afectando características propias del suelo como la disponibilidad de los nutrientes (Conte *et al.*, 2007) y el almacenamiento de agua, provocando una ineficiencia del uso del recurso hídrico y afectando directamente el rendimiento del cultivo (Stelluti *et al.*, 1998). El incremento en la compactación del suelo da como resultado un incremento en la densidad aparente, deteniendo así el desarrollo radicular, la infiltración y los procesos de aireación en la matriz porosa (Jung *et al.*, 2010). Cuando el suelo se compacta, la porosidad del suelo, otras propiedades fisicoquímicas (por ejemplo, el contenido de agua, la permeabilidad al aire o el agua, la resistencia a la penetración, la capacidad de intercambio catiónico, el contenido de materia orgánica, entre otras) y la textura (sobre todo si predomina el contenido de arcillas) se alteran, afectando el desarrollo radicular y, por tanto, el crecimiento del cultivo, y disminuyendo la productividad (Soane y Ouwerkerk, 1994).

Los suelos presentan a lo largo del paisaje una gran variabilidad natural que es resultante de la interacción de los diversos factores de formación implicados en el proceso de meteorización. Esta situación de heterogeneidad del suelo es responsable de la variación espacial de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Considerando que esta variabilidad tiene que ser tomada en cuenta en los procesos de producción agrícola, en los últimos años la llamada agricultura de precisión ha tomado un gran auge (Johann *et al.*, 2004).

La dureza del suelo puede ser calculada con un penetrómetro, que mide la combinación de falla tangencial, compactación y flujo plástico. El valor crítico para esta variable propuesto por Taylor *et al.* (1965) ha sido de 2,5 megapascuales (Mpa), mientras que Forsythe (1985) propuso un valor de 2.96 Mpa, como indicador de restricción al desarrollo radicular a capacidad de campo, pues el porcentaje de penetración de raíces pivotantes disminuyó de manera drástica independientemente del material del suelo.

Materiales y métodos

Localización

El estudio fue desarrollado en el Centro de Formación Agroindustrial La Angostura del SENA, ubicado en el kilómetro 38 vía al sur de Neiva (Huila), en la Vereda Llano, al sur del Municipio de Campoalegre, Huila, Colombia (2° 36' 55" N de latitud Norte, 75° 21' 33" O de longitud oeste); dicho sitio se encuentra a una altitud de 600

metros sobre el nivel del mar, presenta una temperatura promedio de 26.5°C, y corresponde a la zona de vida de bosque seco tropical (bs-T). Es una tierra de influencia aluvial, dada su cercanía al río Neiva; su relieve es plano casi en su totalidad y de pendiente suave, con suelos de textura entre arenosa franca y franca arenosa que drenan bien a moderadamente bien; presenta un color pardo 7.5 YR 4/3.5 en húmedo y 7.5 YR 6/3 en seco en la capa arable del suelo, seguida de materiales como cascajo, gravillas y pedregones, localizados a diferentes profundidades.

Esquema de muestreo

El muestreo se realizó en un lote de 6,4 hectáreas cultivado en su mayor proporción con arroz (*Oriza sativa*) o maíz (*Zea mays*). El área fue proyectada y calculada en el sistema de referencia magna Colombia Bogotá y georreferenciada previamente con GPS nautix x7. Se estableció una distribución espacial de puntos regulares de 35 m por 35 m compuesta por 54 puntos de muestreo.

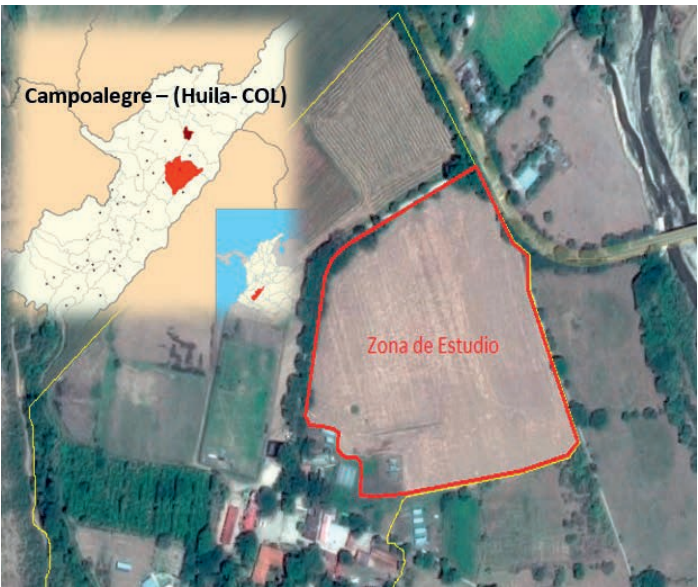


Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio.



Figura 2. Distribución de los puntos de muestreo en la zona de estudio.

Medición en campo y laboratorio

Se ubicaron los puntos con las coordenadas anteriormente obtenidas y se demarcaron con estacas de guadua; las lecturas de R_p se tomaron con el suelo a capacidad de campo con intervalos de 2.5 cm hasta 30 cm de profundidad, mediante penetrómetro digital FieldScout SC 900 de punta cónica de 12,7 milímetros de base, con conexión a receptor GPS garmin 72H, con opción de salida en serie, sensor de profundidad ultrasónica y equipado con puerto registrador de datos interno para luego poder descargar los datos en una PC. En cada punto de muestreo de R_p se determinó la humedad volumétrica a 20 cm de profundidad con el medidor de humedad tipo HH2 marca Delta-T-Devices; se extrajeron 54 muestras de suelo empleando un barreno tipo Edelman y se almacenaron en bolsas selladas ziploc. Seguidamente fueron llevadas al laboratorio y analizadas para determinar diferentes parámetros (textura por método de Bouyoucos, pH, conductividad eléctrica [CE], retención de humedad a capacidad de campo [CC] y punto de marchitez permanente [PMP]).

Análisis estadístico y geoestadístico

Se comprobó si los datos de R_p tienden a una distribución normal; para tal fin, se calcularon por cada profundidad (0.0-30 cm cada 2.5 cm) medidas de tendencia central (media y mediana), estadística descriptiva (mínimo y máximo), de variación (desviación estándar y coeficiente de variación) y de forma (asimetría y curtosis). También se determinó la correlación de Pearson para asociar algunas propiedades con la R_p como indicador principal de compactación.

Se analizó la estructura espacial de los datos mediante el análisis geoestadístico con el programa GS+™, herramienta con la cual se defiende el semivariograma

de mejor ajuste como un indicador del comportamiento espacial de los datos; el cual es definido por Mogollón (2012) como fuerte si se encuentra por encima del 75%, moderado si está entre el 75% y el 25% y débil si es inferior al 25%. Durante el mismo procedimiento y usando el software Arcgis10.1®, se realizó una interpolación por el método de *kriging* ordinario, con el cual se realizan predicciones y se genera valores en zonas no muestreadas, permitiendo analizar el área de estudio.

Resultados

Estadística descriptiva

Los resultados de medias, desviación estándar, coeficiente de variación (CV), sesgo y curtosis (tabla 1) son objeto de análisis porque permiten identificar la normalidad de los datos (Gomes, 1987). De acuerdo con la clasificación del CV (baja $\leq 10\%$; media 10-20%; alta 20-30%; y muy alta $\geq 30\%$), los datos arrojan muy alta variabilidad de datos para las profundidades de cero a veinte centímetros (0-20 cm); y variabilidad alta para valores que oscilan en el rango de veinte a treinta centímetros de profundidad (20-30 cm); valores estadísticos fuera del rango de -2 a +2 en sesgo y curtosis indican desviaciones significativas de la normalidad; el sesgo para el rango de profundidades (0-15 cm) arroja valor estadístico mayor a +2; valores con mayor variabilidad y desviaciones significativas de la normalidad en profundidades bajas ([0-20 cm] capa arable del suelo), se registran por ser la única parte del suelo intervenida por los diferentes implementos para la preparación del suelo, la cual ejerce menos resistencia y varía por apisonamiento o condiciones innatas de formación y datos atípicos de R_p en la zona erial del predio mayores a 3 Mpa.

Tabla 1. Resumen estadístico para valores de Rp (Mpa) a diferentes profundidades.

	Rp (5 cm)	Rp (10 cm)	Rp (15 cm)	Rp (20 cm)	Rp (25 cm)	Rp (30 cm)
Recuento	54	54	54	54	54	54
Promedio	0,817	1,265	2,090	2,712	2,984	3,078
Mediana	0,351	0,746	1,611	2,456	2,994	2,945
Desviación Estándar	0,9173	1,1239	1,1704	0,8445	0,8288	0,6222
Coefficiente de Variación (%)	112,24	88,80	55,98	31,13	27,77	20,22
Mínimo	0,067	0,223	0,702	1,245	1,309	1,755
Máximo	3,045	3,843	4	4	4,318	4
Rango	2,978	3,620	3,398	2,755	3,009	2,245
Sesgo Estandarizado	3,7141	2,5622	2,4627	1,0018	-0,7494	0,4675
Curtosis Estandarizada	0,2180	-1,2511	-1,3523	-1,4995	-1,4266	-1,2041

Tabla 2. Resumen estadístico para algunas propiedades físicas y químicas estudiadas.

	%Arena	%Arcilla	%Limo	Agua disponible (Ad %)	Hv%	CE (dS/m)	pH
Recuento	54	54	54	54	54	54	54
Promedio	74,607	11,290	12,439	13,673	19,223	0,126	6,276
Mediana	74,560	11,080	13,32	12,969	21,20	0,125	6,350
Desviación Estándar	3,611	1,381	3,103	2,863	6,989	0,019	0,482
Coefficiente de Variación (%)	4,84	12,24	24,94	20,93	36,36	15,03	7,69
Mínimo	68,2	9,08	6,16	7,725	6,6	0,094	5,3
Máximo	83,76	14,88	17,36	20,97	34,1	0,172	7,2
Rango	15,56	5,8	11,2	13,25	27,5	0,077	1,9
Sesgo Estandarizado	1,830	1,282	-1,677	1,522	-1,580	1,068	-0,312
Curtosis Estandarizada	0,253	0,167	-1,082	-0,070	-0,684	-0,815	-0,844

La tabla 2 muestra los estadísticos de resumen para siete propiedades o variables estudiadas del área de investigada, incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma, ya que para todos los casos el sesgo y la curtosis se encuentran dentro del rango esperado de -2 a +2; se puede decir que no indican desviaciones significativas a la normali-

dad. Al observar el coeficiente de variación se encuentra variabilidad baja para datos de pH y % de arena; media para CE y % de arcilla; alta para Ad y % de limo; y muy alta para % de Hv. Para todos los casos se realizaron intervalos de confianza del 95%, los cuales arrojaron resultados normales.

Relación de la Rp como indicador de compactación con otras propiedades físicas y químicas

A continuación, se muestra los resultados de coeficiente de correlación de Pearson y la medida de relación lineal entre dos variables cuantitativas. En esta ocasión se realizó para identificar la relación entre todas las variables a profundidades de 30 cm.

La tabla 3 muestra las correlaciones de momento producto de Person entre cada par de variables, de estas

relaciones resaltan la resistencia a la penetración (Rp) y la humedad volumétrica (Hv) con una fuerte relación lineal negativa, con un valor -0,669 lo cual confirma estudios citados y discutidos por Benghough *et al.*, (2001), que indica que las relaciones inversas entre Rp y contenido de humedad, los cuales señala que valores de Rp serán más bajos a medida que la humedad presente en el suelo aumente.

Tabla 3. Resultados correlación de Pearson a 30 cm de profundidad.

	Rp (Prof.30cm)	% arena	% arcilla	% limo	Ad %	CE (dS/m)	Hv %	pH
Rp (Prof 30cm)		<u>-0,044</u>	<u>-0,035</u>	<u>0,072</u>	<u>0,279*</u>	<u>0,368*</u>	<u>-0,669*</u>	<u>0,027</u>
Valor-P		0,751	0,800	0,601	0,040	0,006	0,000	0,845
% arena	<u>-0,044</u>		<u>-0,630*</u>	<u>-0,917*</u>	<u>-0,546*</u>	<u>-0,299*</u>	<u>0,174</u>	<u>-0,242</u>
Valor-P	0,751		0,000	0,000	0,000	0,027	0,206	0,077
% arcilla	<u>-0,035</u>	<u>-0,630*</u>		<u>0,269*</u>	<u>0,220</u>	<u>0,125</u>	<u>0,161</u>	<u>0,341*</u>
Valor-P	0,800	0,000		0,049	0,109	0,364	0,242	0,011
% limo	<u>0,072</u>	<u>-0,917*</u>	<u>0,269*</u>		<u>0,564*</u>	<u>0,306*</u>	<u>-0,299*</u>	<u>0,125</u>
Valor-P	0,601	0,000	0,049		0,000	0,024	0,027	0,364
Ad %	<u>0,279*</u>	<u>-0,546*</u>	<u>0,220</u>	<u>0,564*</u>		<u>0,488*</u>	<u>-0,478*</u>	<u>0,305*</u>
Valor-P	0,040	0,000	0,109	0,000		0,000	0,000	0,024
CE (dS/m)	<u>0,368*</u>	<u>-0,299*</u>	<u>0,125</u>	<u>0,306*</u>	<u>0,488*</u>		<u>-0,385*</u>	<u>0,155</u>
Valor-P	0,006	0,027	0,364	0,024	0,000		0,004	0,262
Hv %	<u>-0,669*</u>	<u>0,174</u>	<u>0,161</u>	<u>-0,299*</u>	<u>-0,478*</u>	<u>-0,385*</u>		<u>-0,015</u>
Valor-P	0,000	0,206	0,242	0,027	0,000	0,004		0,914
pH	<u>0,027</u>	<u>-0,242</u>	<u>0,341*</u>	<u>0,125</u>	<u>0,305*</u>	<u>0,155</u>	<u>-0,015</u>	
Valor-P	0,845	0,077	0,011	0,364	0,024	0,262	0,914	

Valor subrayado: coeficiente de correlación; (*): correlaciones significativas diferente de cero con NC 95%.

La correlación de agua disponible y porcentajes de clases texturales tales como arena y limo es visible; en el caso de Ad-% de arena, es una correlación negativa significativa en contraste con Ad-% de limo, siendo esta última positiva pero con un valor similar, esto debido al contenido de macroporos en las arenas que permite una velocidad de infiltración rápida y el agua útil es menor, y microporos en los limos con velocidades de infiltraciones más lentas por cual el Ad aumenta o disminuye directa o indirectamente proporcional según la textura del suelo.

Variabilidad espacial

Se realizó análisis geoestadístico de los datos de Rp como indicador de compactación del suelo. La tabla 4 muestra los resultados de semivariograma generado para 6 profundidades de datos almacenados, en los cuales, mediante diferentes parámetros, se ajustó y determinó el mejor modelo acorde a los datos. Siendo Co: pepita-nugget; Co+C: meseta-Sill; C/Co+C: depen-

dencia espacial; R²: coeficiente de determinación; GDE%: grado porcentaje dependencia espacial; RMSE: error de raíz cuadrada media.

Los valores del R² cercanos a 1 indican un buen ajuste de los datos al modelo, es decir que los modelos definidos representan la variabilidad de la propiedad del suelo analizada. De igual manera, los valores de RMSE no sobrepasan los 0,512, lo que es indicador también de un buen ajuste entre los valores observados y predichos, ya que valores más cercanos a cero indican un mejor ajuste. El rango mínimo es de 184,5 m para el caso de Rp a 30 cm de profundidad, indicando que valores fuera de este son independientes espacialmente, el GDE está por encima de 88,6% una dependencia fuerte en todos los datos de diferentes profundidades de Rp que da confianza en la predicción de datos.

Los modelos semivariograma en la tabla 5 arrojan datos significativos de buen ajuste para la mayoría de

Tabla 4. Resultados semivariograma isotrópico para valores de Rp (Mpa) a diferentes profundidades.

	Modelo	C _o	C _o +C	C/C _o +C	Rango (m)	R ²	GDE (%)	RMSE
Rp (5 cm)	Gaussiano	0,1040	1,061	0,902	220,32	0,998	90,2	0,4032
Rp (10 cm)	Gaussiano	0,2000	1,747	0,886	252,53	0,995	88,6	0,4532
Rp (15 cm)	Exponencial	0,0010	1,923	0,999	348,30	0,997	99,9	0,4020
Rp (20 cm)	Exponencial	0,1240	1,367	0,909	623,70	0,969	90,9	0,5110
Rp (25 cm)	Exponencial	0,0580	0,860	0,933	231,90	0,974	93,3	0,4810
Rp (30 cm)	Exponencial	0,0130	0,417	0,969	184,50	0,994	96,9	0,4134

Tabla 5. Resultados semivariograma isotrópico propiedades a 30 cm de profundidad.

Prof. 30 (cm)	Modelo	Co	Co+C	C/Co+C	Rango (m)	R2	GDE (%)
Rp	Exponencial	0,0130	0,417	0,969	184,50	0,994	96,9
% Arena	Exponencial	2,0800	14,72	0,859	199,50	0,996	85,9
% Arcilla	Exponencial	0,2910	2,182	0,867	120,90	0,983	86,7
% Limo	Esférico	3,5600	9,068	0,607	134,20	0,995	60,7
Ad %	Esférico	2,2000	8,563	0,743	118,40	0,998	74,3
Hv %	Gaussiano	20,800	72,60	0,713	294,44	0,955	71,3
CE (dS/m)	Exponencial	3E-5	37E-4	0,917	119,40	0,970	91,7
pH	Exponencial	0,0039	0,229	0,983	79,50	0,993	98,3

variables; el R^2 es mayor a 0,95 y el grado de dependencia espacial es fuerte en el peor de los casos con valor de 60,7; el rango de menor dependencia espacial es de 79,5 m.

Los modelos definidos en el análisis geoestadístico indican un buen ajuste, reflejado tanto por el rango y como por el grado de dependencia espacial, lo que indica que las condiciones son similares en los distintos puntos de muestreo y, por consiguiente, que están relacionadas espacialmente (espacialmente dependientes); dado el caso de rango para R_p con distancias mayores a 79,5 m muy por encima del esquema de muestreo de 35 m, y no teniendo mayores variaciones en las diferentes propiedades estudiadas.

Mapas kriging

Se obtuvieron mapas de interpolación y predicción por el método *kriging* ordinario utilizando los sistemas de información geográfica y software GIS, a partir de los modelos mejor ajustados con el semivariograma. Los mapas *kriging* generados en contorno fueron exportados a tipo *raster* permitiendo una mejor visualización e

identificación de zonas para los valores de R_p y demás propiedades relacionadas.

En los mapas de interpolación por el método *kriging* para profundidades de 20 y 30 cm (figuras 3 y 4, respectivamente) se observa el aumento de R_p como indicador de compactación en transición de una profundidad a otra.

Los tres colores en los mapas identifican zonas con diferencias en la resistencia a la penetración. Los índices de compactación cuyo valor supera los 2,5 Mpa se indican con colores en transición de amarillo a rojos aumentando su intensa tonalidad proporcionalmente a la profundidad, según Taylor *et al.*, y Forsythe reportan valores de R_p por encima de 2,5 Mpa como indicador de restricción en el crecimiento radicular de las plantas, y por ende influyendo en el crecimiento de la planta. Estas limitantes debido a condiciones de compactación a profundidades del suelo sobre piso de arado, combinado con altas fluctuaciones del contenido de agua y temperatura del horizonte superficial, puede resultar en una mayor vulnerabilidad del cultivo a la aireación y a

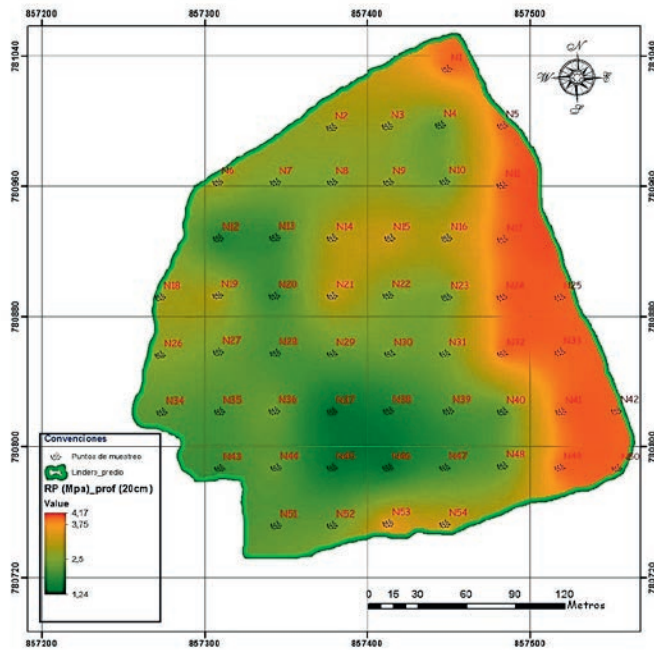


Figura 3. Mapas raster kriging R_p profundidad 20 cm.

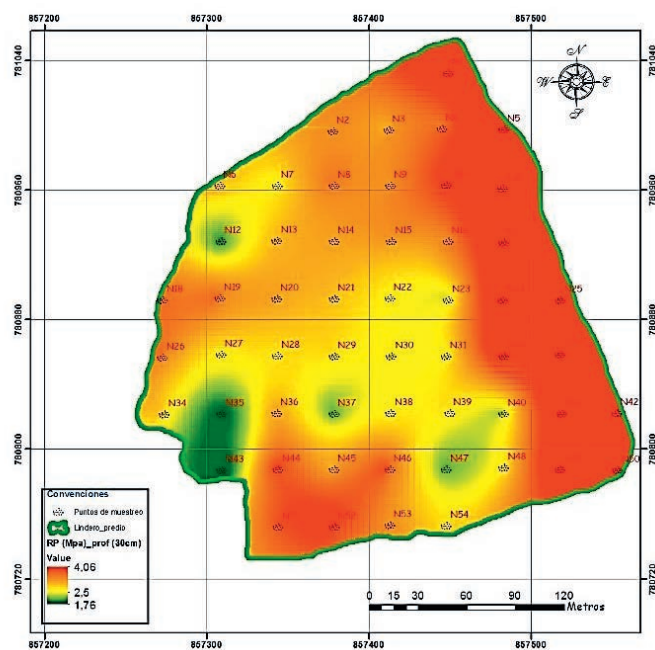


Figura 4. Mapas raster kriging R_p profundidad 30 cm.

un *stress* de humedad o nutrimentos (Materechera *et al.*, 1993).

Las condiciones favorables para el crecimiento radicular están asociadas a cualidades del suelo como la distribución de poros y la facilidad del movimiento del agua, además de las condiciones de formación del suelo que le confieren una variabilidad natural a estas propiedades (Gomes *et al.*, 2007), es por eso que se plasmaron en mapas *kriging*, mediante el método geostadísticos, la Rp como índice principal de compactación y otras propiedades que fueron asociadas a este problema.

Al identificar las características de compactación en la totalidad del predio podemos delimitar zonas de manejo de este problema, tal como lo resume la definición de Agricultura de Precisión (AP), una tecnología que se basa en obtener datos georreferenciados de los lotes para lograr un mayor conocimiento de los factores que contribuyen a la variabilidad que se presenta a nivel del lote, y así delimitar las Zonas de Manejo (ZM) (Anselin *et al.*, 2004). Siendo estas las de color rojo como anteriormente se mencionada las que presentan problema como indicadores fuertes de compactación.

Los mapas de predicción e interpolación *kriging* (ver figura 5) ratifican gráficamente el análisis ya hecho con las correlaciones de Pearson, confirmando así

que la Rp está ligada fuerte e inversamente al %Hv y un poco directamente a la CE. La CE del suelo muestra gráficamente su correlación con, donde muestran zonas con matices similares y dando a pensar que el agua de riego es la principal influyente en que esto se presente, debido también a que el % de Limo en las zonas donde aumenta la CE es también mayor. Los limos, por tener mayor cantidad de microporos, permiten poca permeabilidad e infiltración, mientras que el %Ad es mayor y la CE aumenta en esos lugares.

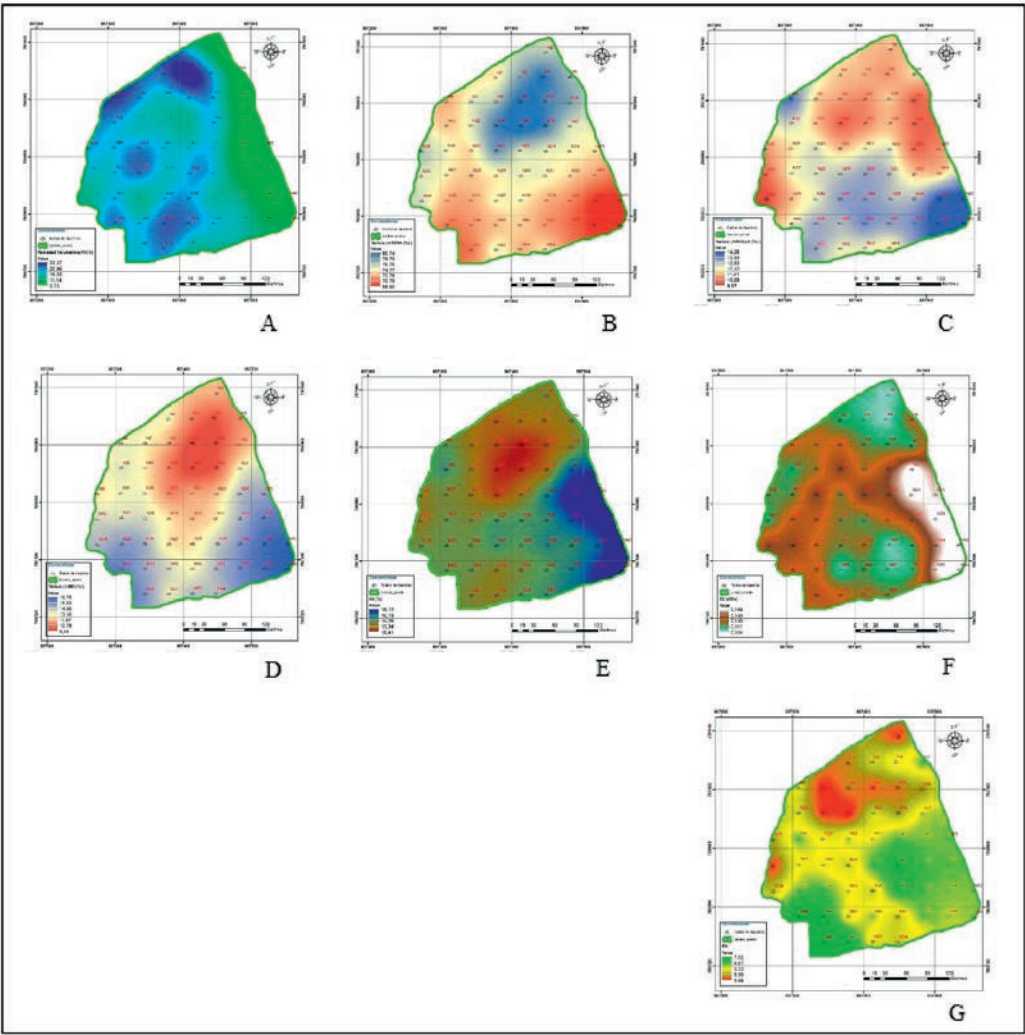


Figura 5. Mapas raster de interpolación *kriging* para las variables estudiadas. **A)** % Hv; **B)** %Aren; **C)** %Arcilla; **D)** %limo; **E)** %Ad; **F)** CEdS/m; **G)** pH.

Los gráficos resaltan la zona erial del terreno, la cual es fácil identificar en los mapas de Rp a 20 cm en las zonas de color rojo intenso y en Hv en las zonas color verde, e influyó como un margen de identificación pues las características que en esa parte varían abruptamente debido al poco laboreo y la falta de uso.

Para los casos de pH y CE, que gráfica y estadísticamente muestran valores promedio de 6,2 y 1,2 dS/m, respectivamente, no son identificados y relacionados directamente con el problema de la compactación, pero sí con la calidad del suelo mismo, indicando normalidad en salinidad y un valor de pH ligeramente ácido, según lo indica la clasificación del departamento de agricultura de los Estados Unidos (USDA).

Conclusiones

El lote de estudio del Centro de Formación Agroindustrial La Angostura tiene problemas de compactación, teniendo en cuenta como índice de este la Rp, la cual encuentra valores por encima de 2,5 Mpa en algunas partes del predio a los 20 cm de profundidad, y casi en su totalidad a los 30 cm, lo cual origina limitaciones físicas para el buen desarrollo radicular de los cultivos, problema que incide notoriamente en la producción agrícola (disminuyéndola), debido a que no se presentan las características de porosidad apropiadas, e incidiendo en la deficiente relación suelo-planta, lo que impide la absorción de agua y nutrientes. Hay que analizar estas dos situaciones y tener en cuenta los cultivos que se establecen, pues no habría necesidad de usar implementos agrícolas para la descompactación en la mayor parte del lote a 20 cm, mientras que a 30cm sí, delimitando así ZM.

Los resultados del estudio estadístico y geoestadístico fueron esenciales para una mejor interpretación de los datos obtenidos en campo y laboratorio, pues generaron una buena síntesis y demostraron la confiabilidad de los mismos. De igual forma, se pudo graficarlos en mapas de interpolación *kriging* para inferir sobre las

zonas no muestreadas gracias a las predicciones, realizando un análisis de variabilidad espacial y una correlación de los pares de datos que permitieron identificar el comportamiento de las variables, para así permitir realizar un diagnóstico y determinar las zonas de mayor o menor afectación.

Referencias bibliográficas

- Amézquita, E. (1998). "Hacia la sostenibilidad de los suelos de los Llanos Orientales". *IX Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo, Paipa-Boyacá*. Colombia, octubre 21-24.
- Anselin, L.; Bongiovanni, R.; y Lowengberg-Deboer, J. A. (2004). "Spatial econometric approach to the economics of site-specific nitrogen management in corn production". *American Journal of Agricultural Economics*. 86: 671-683.
- Bengough, A. G.; Campell, D. J.; y O'Sullivan, M. F. (2001). "Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth". En Decker, Marcel, *Soil & Environmental Analysis: Physical Methods*, pp. 377-404.
- Cambardella, C. A.; Moorman, T. B.; Novakj, M.; Parkin, T. B.; Karlen, D. L.; y R. F. Y. K. A. E. Turco (1994). "Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils". *Soil Science*: 1501-1511.
- Conte, O.; Levien, R.; Trein, C. R.; Cepik, C. T. C.; y Debiasi, H. (2007). "Demanda de tracao em haste sulcada na integracao lavoura-pecuaria con diferentes pressoes de pastejo e sua relacao con o estado de compactacao do solo". *Engenharia Agricola, Jaboticabal*. 27(1): 220-228.
- FAO (1990). *Statistical Series*, 43(94).
- Forsythe W. (1985). *Manual Laboratorio Física de suelos*. Costa Rica: IICA.
- Gomes, N.; Silva, A.; Mello, C.; Faria, M.; y Oliveira, P. (2007). "Métodos de ajuste e modelos de semivariograma

aplicados ao estudo da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo, Vicosa*, 31: 435-443.

Gomes, P. (1987). *Curso de estadística experimental*. Brasil.

Johann, J. A.; Opazo, M. A. U.; Souza, E. G.; y Rocha, J. V. (2004). "Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade em um Latossolo Bruno distrófico da região de Cascavel, PR". *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, 8(2-3): 212-219.

Jung, K. Y.; Kitchen, N. R.; Sudduth, K. A.; Lee, K. S.; y Chung, S. O. (2010). "Soil compaction varies by crop management system over a claypan soil landscape". *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.107(1): 1-10.

Materechera, S. A.; A. M. Alston; J. M. Kirby y A. R. Dexter (1993). "Field evaluation of laboratory techniques for predicting the ability of roots to penetrate strong soil and of the influence of roots on water sorptivity". *Plant and Soil*, 149: 149-158.

Mogollon R. (2012). "Comportamiento espacial de la resistencia mecánica a la penetración y su relación con propiedades físicas del suelo en áreas con diferentes usos y ocupaciones en la Sabana de Bogotá". Bogotá.

Oldeman, L. R. (1994). "The global extend of soil degradation". En Greenland, D.J. y S. Zabolcs (eds.). *Soil Resilience and Sustainable Land Use*. I. CAB International, Wallingford. Short Run Press Ltd., U.K. pp. 99-118.

Soane, B. D.; y Ouwerkerk, C. van (1994). "Soil compaction problems in world agriculture". En: *Soil Compaction in Crop Production*, Elsevier, Amsterdam, pp.1-21.

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

Taylor H.; Roberson G.; y Parker J. (1965). "Soil Strenght Root penetration relations for medium to coarse textured soil materials". *Soil Science*: 18-22.