

SUELO

ARTÍCULO ORIGINAL

Resistencia mecánica de suelos de la Mesa de Guanipa, Estado de Anzoátegui, Venezuela

Mechanical resistance in soils at the Guanipa Plateau, State of Anzoátegui, Venezuela

Dr.C. Jorge García Coronado^I, Dr.C María E. Ruíz Pérez^{II}, Dr.C Pablo M. Hernández Alfonso ^I, MSc. Vilma Toledo Diepa^I, MSc. Francisco Salguero Santana ^I, MSc. Nilda L. Castillo^{III}

^IUniversidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

^{II}Universidad Estatal Amazónica de Puyo, Ecuador.

^{III}Universidad Politécnica Territorial “José Antonio Anzoátegui”, El Tigre, Edo. Anzoátegui, Venezuela.

RESUMEN. Con el empleo de un penetrómetro dinámico de cono (PDC) se evaluó la resistencia a la penetración (RP) de un suelo arenoso de la Mesa de Guanipa, correspondiente a una parcela experimental de la Universidad Politécnica Territorial “José Antonio Anzoátegui” con más de 30 años de explotación con manejos mecanizados. Se contabilizan el número de golpes de la maza de impacto necesarios para explorar el comportamiento mecánico del suelo a las profundidades de interés. El suelo muestra una elevada resistencia mecánica ($3,34 \pm 4,00$ MPa), obteniéndose que los valores de la RP aumentan a partir de 15 a 30 cm, con máximos a los 25 cm, siendo las profundidades mayores inaccesibles por el penetrómetro a causa de la elevada impedancia mecánica del suelo ligada a las prácticas mecanizadas. La formulación de Dutch completa refleja de manera más acertada el carácter marcadamente arenoso de este suelo, su estado estructural y la realidad experimental en la cual la punta cónica se introduce varios centímetros de profundidad, sin auxilio de la masa de impacto (cero número de golpes). En estos casos al suelo se le asocia un valor de RP distinto de cero e igual al peso total del PDC dividido el área del cono, denominada presión estática.

Palabras clave: formula de Dutch completa, impedancia mecánica del suelo, presión estática.

ABSTRACT. Penetration resistance (RP) was measured using a dynamic cone penetrometer (PDC) in a sandy soil of the Guanipa Plateau. Measurements were carried out in an experimental plot with more than 30 years of agricultural mechanized practices at the Technical Territorial University “José Antonio Anzoátegui”. The number of hammer drops necessary to explore the soil mechanical behavior at the studied soil shows high RP values ($3,34 \pm 4,00$ MPa), that increase from 15 to 30 cm, with peaks at 25 cm, being the higher depth inaccessible for the PDC associated with elevated soil mechanical resistance caused by the mechanized practices. Dutch complete is the formulation that best reflect the marked sandy, structural and experimental soil conditions, where the conical tip penetrated the soil surface without any hammer drop. This causes values associated to the RP different from zero (0,14 MPa) and equal to the total weight of the penetrometer divided by the cone area (static pressure).

Keywords: Dutch complete equation, static pressure, soil mechanical resistance.

INTRODUCCIÓN

La resistencia del suelo es una característica importante que afecta muchos aspectos de los suelos agrícolas, la cual constituye un indicador del grado de compactación. La compactación limita el crecimiento radicular y la cantidad de aire y agua de que disponen las raíces (Herrick y Jones, 2002; Lampurlanés y Cantero-Martínez, 2003). Una forma de medir la resistencia a la penetración es calcular la resistencia del suelo al movimiento

de un cono, y dividirla entre la profundidad de la penetración.

Los penetrómetros son mundialmente empleados para determinar la resistencia del suelo, expresada como fuerza por unidad de área de la sección transversal de la base del cono (Bengough *et al.*, 2001¹). Todos los penetrómetros son sensibles a las diferencias existentes en humedad, densidad aparente y la textura del suelo, razón por la cual es también aconsejable medir

¹ BENGOUGH, A.G., CAMPBELL, D.J., O’SULLIVAN, M.F.: *Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. In Soil and Environmental Analysis. Physical Methods.* 2nd Edition. Ed. KA Smith, CE Mullins. pp. 377-403. Marcel Dekker: New York, 2001.

estas características al usar un penetrómetro (Vaz y Hopmans, 2001; Herrick y Jones, 2002).

Los mismos suelen ser estáticos o dinámicos. Los estáticos miden la fuerza empleada para empujar una sonda en el suelo a una velocidad constante, en tanto los dinámicos miden la resistencia a la penetración al golpear la sonda repetidamente en el suelo.

El Penetrómetro Dinámico de Cono (PDC) ha sido empleado para caracterizar la resistencia a la penetración del suelo bajo diferentes manejos (Vanags *et al.*, 2004; Changho *et al.*, 2014), constituyendo una herramienta simple y sencilla que permite realizar de una manera expedita una exploración *in situ* de las capas de suelo. Estos son instrumentos confiables, durables y de bajo costo que permiten evaluar la compactación del suelo, además pueden ser utilizados por operarios sin experiencia, como los agentes de extensión o los productores (Herrick y Jones, 2002). En general, se basan en el conocimiento de la cantidad de energía necesaria para mover la punta cónica una cierta distancia a través del suelo. Sin embargo, en ocasiones las expresiones en las cuales se sustentan los cálculos no reflejan un claro sentido físico.

La Mesa de Guanipa, estado Anzoátegui, en Venezuela, cuenta un marcado patrón de variabilidad en cuanto a frecuencia y las precipitaciones, un gran acuífero subterráneo y alrededor de 300 mil hectáreas destinadas a labores agropecuarias por Empresas Integrales de Producción Agraria, las cuales cuentan con alto grado de mecanización y en menor medida por productores privados. Dicha mesa presenta suelos de textura muy gruesa con baja capacidad de retención de humedad, susceptibilidad a la compactación, riesgos de erosión por impacto de las gotas de lluvia y escorrentía, que demuestra la gran fragilidad y vulnerabilidad de sus suelos. La rastra de discos es utilizada como apero de labranza para la preparación de suelo y el control de malezas, cuya etapa de mayor uso es coincidente con el período lluvioso (Hossne, 2006).

En la denominada Mesa de Guanipa se encuentra la Universidad Politécnica Territorial “José Antonio Anzoátegui” (UPTJAA), cuyos orígenes datan desde 1977 con el objeto de desarrollar proyectos y programas académicos de formación,

creación intelectual, desarrollo tecnológico, innovación, asesoría y vinculación social en todo el estado Anzoátegui, en estrecha relación con la Misión Sucre y a través de alianzas con otras instituciones de educación universitaria (Decreto 936 / 2014).

El suelo de las parcelas experimentales de la Universidad Politécnica Territorial “José Antonio Anzoátegui”, representativos de los que subyacen a lo largo y ancho de la Mesa de Guanipa, soportan el peso del uso continuado de la maquinaria agrícola por más de 30 años. En este particular no existe un estudio dirigido a calificar y cuantificar el efecto degradante causado por los manejos convencionales que han sido objeto.

El estudio de estas propiedades es importante cuando los suelos se ven afectados por estos procesos ya que nos permite tomar decisiones, introducir o transferir tecnologías para su mejoramiento e incrementar los rendimientos de los cultivos, trazar el plan estratégico del establecimiento y rotación de cultivos y hacer un uso adecuado de la mecanización. Con el fin de evaluar el efecto de la maquinaria sobre las propiedades mecánicas de suelo se utiliza un penetrómetro dinámico de cono perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA) del estado Anzoátegui. Como antecedentes, Nacci y Pla (1992) validaron para otras regiones de Venezuela el comportamiento de estos equipos en diferentes tipos de suelos y de manejo de los mismos.

El objetivo de esta investigación fue evaluar la impedancia mecánica de un suelo arenoso de la Mesa de Guanipa mediante el empleo del penetrómetro dinámico de cono y de las expresiones para traducir el número de golpes a valores de resistencia a la penetración.

MÉTODOS

Descripción del área experimental

El área objeto de investigación pertenece a la Universidad Politécnica Territorial “José Antonio Anzoátegui” (UPTJAA) ubicado en la Carretera Nacional El Tigre-Ciudad Bolívar. La misma está enmarcada en la zona de influencia de la cuenca del Orinoco, al sur del Estado Anzoátegui, Municipio Simón Rodríguez, en la denominada Mesa de Guanipa (Figura 1).

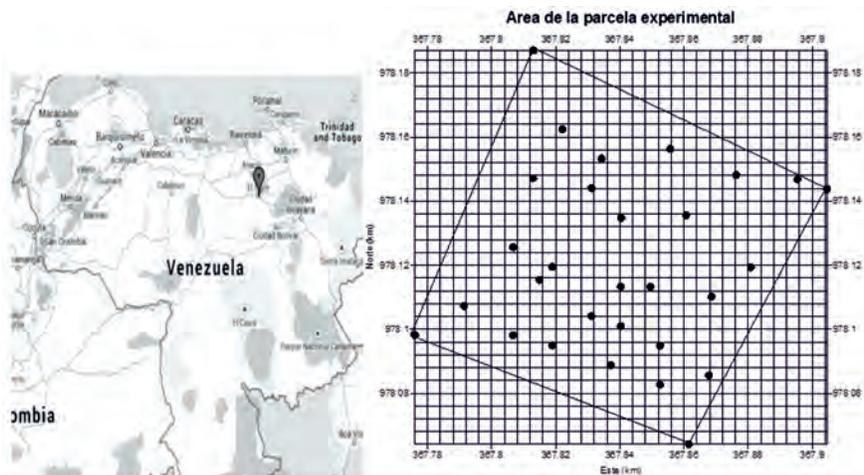


FIGURA 1. Ubicación geográfica de la parcela experimental perteneciente a las áreas de la Universidad Politécnica Territorial “José Antonio Anzoátegui” (UPTJAA), Municipio Simón Rodríguez, Estado Anzoátegui. Los puntos en el esquema de su distribución espacial se representan en coordenadas planas.

La misma se localiza entre los 8°50'48,1" y 64°12'6,6", y posee una superficie aproximada de 0,8 ha de suelos de textura gruesa (Tabla 1) destinados por más de 30 años a prácticas agrícolas bajo manejos convencionales, destacándose la rastra de disco que es utilizada en Venezuela como apero de labranza primaria y a la vez para la preparación de camas para la siembra por desmenuzar los terrones, controlar malezas, mezclar cal, fertilizantes, herbicidas y la incorporación de cualquier tipo de material al suelo (Hossne, 2006).

El laboreo con auxilio de la maquinaria se realiza en cualquier época del año, sequía y lluvia, sin un análisis consensuado que tuviese en cuenta las particularidades del clima y del suelo en cuestión, especialmente la humedad óptima de labranza.

TABLA 1. Comportamiento estadístico de la composición textural del suelos de la parcela experimental (adaptadas de Castillo, 2015¹)

Propiedad	N	Media	Mín.	Máx.
Arena (%)	25	91,6	88	94
Limo (%)	25	6,4	4	10
Arcilla (%)	25	2,08	2	4

La Figura 2 muestra el balance hídrico de la región la cual permite sintetizar el período histórico de déficit y excesos hídricos, arrojando claridad en relación a los escenarios y las complejidades del uso de la maquinaria agrícola y sus consecuencias para los suelos de la región de la Mesa de Guanipa.

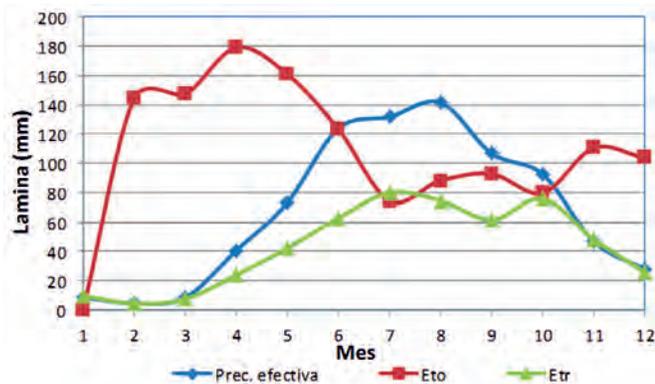


FIGURA 2. Balance hídrico promedio de la zona de la Mesa de Guanipa en el período 1998-2014. Adaptado de datos mensuales de la Estación climatológica del Servicio de Agrometeorología-INIA, El Tigre, Anzoátegui, Venezuela.

Diseño experimental

Para la selección de los puntos se planteó muestreo aleatorio sistemático que combina las ventajas de una rejilla regular y la aleatorización (Webster y Oliver, 1990). Con este fin se superpuso una rejilla regular principal con 36 nodos (Figura 1), conformada por celdas de 17 m de ancho por 18 m de largo. El largo y alto de las celdas satisfacen el propósito de conservar las mismas proporciones relativas a las dimensiones de la parcela (≈0,8 ha).

Tanto el valor de X como los de Y se obtuvieron mediante generación aleatoria de números entre 1 y 50, a partir del esquema de subdivisión secundario. Note, como bien se muestra en la propia figura, que la posición relativa de la coordenada X será también variable entre columnas. La inserción de la X y la Y resultante para cada celda definen en punto experimental, los cuales totalizan 25 sitios de muestreo.

La resistencia a la penetración fue obtenida con el auxilio de un penetrómetro dinámico de cono como el representado en la Figura 3, facilitado por el Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA) radicado en El Tigre, Anzoátegui, Venezuela. El mismo constaba de una punta cónica con área de la base 5,06 x10⁻⁰⁴ m², ángulo del cono de 60°, distancia de caída libre de 0,6 m y masa total y de impacto de 7 y 2,3 kg, respectivamente.

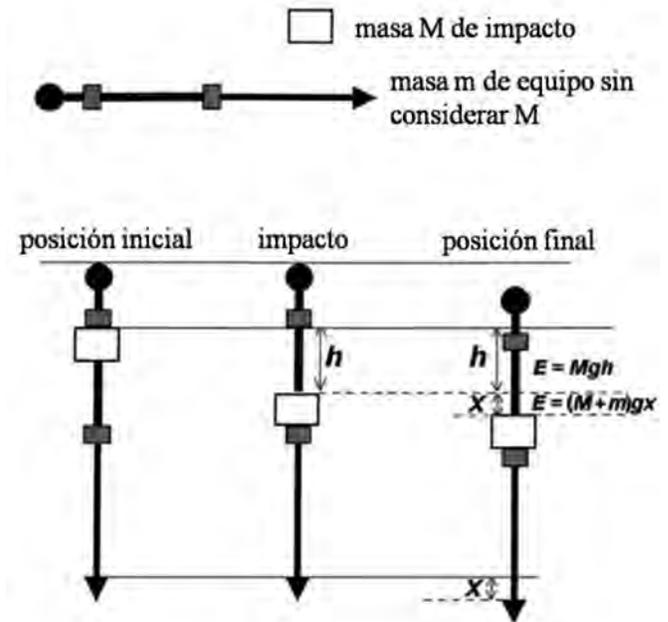


FIGURA 3. Esquema de un penetrómetro dinámico de cono, tomando la superficie del terreno como referencia, donde la masa M alcanza el equilibrio h + x por debajo de su posición inicial, y la masa m alcanza el la distancia de equilibrio x por debajo de su posición inicial (Adaptado de Stolf et. al., 2005).

El Penetrómetro fue colocado en posición perfecta- mente vertical, como en la Figura, asegurando retirar de la superficie del suelo cualquier obstáculo que impidiese ver con claridad la escala indicativa de profundidad del penetrómetro. El procedimiento requiere llevar la maza de impacto al tope superior sin golpear el mismo, soltarla libremente recorriendo esta 0.6 m hasta el tope inferior y luego registrar la lectura. Este procedimiento se repite hasta que el cono penetre hasta la profundidad de interés. Se registraron lecturas del número de golpes a intervalos de 5 cm desde la superficie hasta profundidades de 30 cm o mayores, donde las condiciones del suelo así lo permitían.

Las lecturas obtenidas del número de golpes fueron traducidas a valores de RP mediante las expresiones de la Tabla 2.

TABLA 2. Expresiones para el cálculo de los valores de RP a partir de las lecturas del Penetrómetro dinámico de cono

Stolf et al. (1983) (Núñez et al., 2010)	$RP = \frac{N M g h}{A D} \quad (1)$
A- área de la base del cono; g- aceleración de la gravedad; M- masa de impacto.	h –distancia de golpeo o altura de caída de caída libre de M; D- distancia de penetración; N- numero de golpes.
Ducht Completa (Stolf et al., 2005)	$RP = \frac{M}{(M+m)} \frac{Mgh}{Ax} + (M + m) \frac{g}{A} \quad (2)$
m-masa del penetrómetro (kg) sin considerar la de impacto (M); x- penetración por golpes o efectiva.	

Los análisis estadísticos se fundamentan en el cálculo de la media aritmética (\bar{Z}), la desviación estándar (σ), el error medio (EM) y el valor de la raíz del error cuadrático medio (RECM), estos últimos cuantificados a partir del error de la medición en cada punto Z_i mediante las expresiones (3), (4), (5) y (6), respectivamente. En estas expresiones Z_e simboliza los valores estimados.

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{z})^2} \quad (4)$$

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_e - Z_i) \quad (5)$$

$$RECM = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_e - Z_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Con el propósito de evaluar las principales tendencias dentro del área se generaron mapas de RP con auxilio de técnicas geoestadísticas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Lecturas del PDC

En la Tabla 3 se muestra el resumen estadístico del número de golpes (N) contabilizados por profundidades exploradas con el PDC necesarios para colocar la punta cónica a la profundidad de suelo de interés, así como estas lecturas traducidas en cm de suelos penetrados por golpes o impactos de la masa en caída libre.

La primera observación está dirigida a explicar porqué en no pocos casos, 25 en total entre 0 y 3cm, el valor del número de golpes es cero. En estos casos los primeros centímetros del suelo apenas poseen estructura, propiciándose que la puna cónica se hincó varios centímetros de profundidad debido solo al peso del penetrómetro en posición vertical, es decir sin golpe alguno o aporte de energía por caída libre de la masa de impacto.

TABLA 3. Comportamiento estadístico promedio de las n mediciones por profundidad del número de golpes (N) y de la penetración por cada golpe (x) registrados con el penetrómetro dinámico de cono

Prof. (cm)	N					x (10 ⁻² cm/golpes)				
	n	Media	Mín.	Máx.		n	Media	Mín.	Máx.	
0	8	0,00	0,00	0,00	-	8	0,00	0,00	0,00	-
2	5	0,00	0,00	0,00	-	5	0,00	0,00	0,00	-
3	12	0,00	0,00	0,00	-	12	0,00	0,00	0,00	-
10*	25	15,16	3	34	8,52	25	0,72	0,21	2,33	0,45
15*	25	24,36	7	68	15,89	25	0,28	0,07	0,71	0,15
20*	5	91,8	45	163	52,49	5	0,09	0,03	0,14	0,05
25*	2	46	32	60	19,80	2	0,24	0,13	0,34	0,15
30*	17	105,88	56	233	42,90	17	0,16	0,06	0,27	0,05
35	1	21	21	21	-	1	0,95	0,95	0,95	-
Total	100	33,6	0	233	44,24	100	0,29	0,00	2,33	0,36

Nota: * representa diferencias estadísticamente significativas para un nivel de confianza del 99,0 %.

Una segunda observación apunta a llamar la atención en el hecho que la profundidad explorada, hasta 35 cm, estuvo por debajo de la que potencialmente permitía el equipo (50 cm). Ello se asocia a la textura gruesa de este suelo y al estado apreciablemente seco del suelo propio del período ensayado, siendo la humedad promedio de muestreo baja, $\bar{\Theta}_g = (8,68 \pm 0,85) \times 10^{-2} \text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. Por otra parte, se tiene además el hecho que el PDC cuenta con una masa de impacto de 2,6 kg, la cual presupone que en muchos casos esta no provee la energía suficiente para vencer la impedancia de suelo más allá de los 30 cm de profundidad.

En este último particular, el kit de muestreo del PDC no cuenta con variantes del peso de la masa de caída libre (usualmente de 2 hasta 8 kg) ni otras variantes de puntas cónicas. No obstante esta dificultad experimental, su uso de conjunto con las principales causas del deterioro físico de estos suelos dado su carácter muy arenoso, las condiciones climáticas y las prácticas de manejo agrícola, entre ellas el laboreo mecanizado continuado en condiciones de humedad no óptimas (Castillo, 2015), constituyen una valiosa herramienta para dilucidar el efecto antrópico en la Mesa de Guanipa.

Adicionalmente a los valores correspondientes al número de golpes, la tabla también muestra los centímetros de suelo sondeados por cada golpe de la masa de impacto en caída libre (10^{-2} cm/golpes). Para que se tenga idea la penetración efectiva promedio registrada fue de $0,29 \times 10^{-2}$ cm/golpes, lo cual obedecen a fuerzas promedios de $4,99 \text{ N/m}^2$. Ello da la medida de la fuerza que deberán durante su desarrollo ejercer las raíces de los cultivos instaurados en estos suelos.

El número de golpes (N) es de gran utilidad para el pro-

pósito real de detectar cambios en las condiciones físicas del suelo, sin embargo no es un registro comunmente manejado en la literatura. Por ello, es conveniente traducir los golpes de la masa de impacto en valores de RP mediante las formulaciones propuestas en el trabajo.

Calculo de la RP

La Tabla 3 resume el comportamiento estadístico de la resistencia a la penetración (RP) calculada mediante las expresiones 1 y 2. Se aprecia que dicha distribución tipifica la del número de golpes. Se observa que la primera profundidad registrada es variable entre los puntos muestrales. En ocho de ellos se alcanza a sensar el suelo a los 0 cm de profundidad, cinco se inician a los 2 cm y 12 a los tres. En todos los casos sin la incidencia de la energía que provee la masa de impacto (N = 0).

Del comportamiento de la RP a profundidades mayores se denota que el suelo ofrece una elevada resistencia mecánica a los bajos niveles de humedad de muestreo. Los mayores valores de resistencia a la penetración tienen lugar entre los 15 y 25 cm de profundidad, lo cual reafirma las restricciones físicas del suelo para el crecimiento y desarrollo de las raíces en toda el área experimental atribuida al efecto de manejos convencionales. La misma tendencia se refleja en el comportamiento en profundidad de número de golpes. Nacci y Pla (1992) igualmente reportan como disposición que los mayores valores de la RP se localizan entre los 10 y 20 cm para varios tipos de suelos de Venezuela, sujetos a diferencias texturales y de manejo. Estos autores hallan igual propensión para la densidad aparente y atribuyen el resultado a la presencia de una capa compacta.

TABLA 3. Comportamiento estadístico de la resistencia a la penetración (MPa) de un suelo arenoso de la Mesa de Guanipa calculada según la formulación de Stolf (1983) y de Dutch Completa (Stolf et. al., 2005)

Prof. (cm)	RP_Stolf (1983) (MPa)				RP_de Ducht Completa (MPa)					
	n	Media	Mín.	Máx.	n	Media	Mín.	Máx.	Σ	
0	8	0,00	0,00	0,00	-	8	0,14	0,14	0,14	-
2	5	0,00	0,00	0,00	-	5	0,14	0,14	0,14	-
3	12	0,00	0,00	0,00	-	12	0,14	0,14	0,14	-
10*	25	5,04	1,15	13,00	3,09	25	1,73	0,50	4,23	0,97
15*	25	13,04	3,75	36,39	8,50	25	4,24	1,32	11,58	2,67
20*	5	53,17	19,11	145,39	53,03	5	13,20	6,15	27,57	8,94
25*	2	13,93	7,78	20,07	8,69	2	4,52	2,59	6,45	2,73
30*	17	19,29	9,99	41,56	7,58	17	6,21	3,28	13,21	2,38
35*	1	2,81	2,81	2,81	.	1	1,02	1,02	1,02	.
Total	100	10,76	0,00	145,39	16,93	100	3,34	0,14	27,57	4,00

Nota: * Denota diferencias significativas éntrelas RP calculadas por ambas expresiones (nivel de significación del 95%).

Véase que en la formulación de Stolf (1983) no se reportan valores de la RP en los primeros centímetros del suelo. Ello se considera una incongruencia desde el punto de vista físico y un inconveniente para su uso en estos suelos arenosos con estas particularidades estructurales en sus capas superficiales. Por otro parte, Stolf (1983) reporta RP sumamente elevados que difícilmente se alcanzan en la práctica, dado el carácter sumamente arenoso de estos suelos. Sus altos valores obedecen a que en esta formulación existe una fuerte proporcionalidad entre los elevados valores del número de golpes y la RP calculada. Ello se aprecia claramente en la Figura 4, la cual revela el comportamiento promedio por profundidades exploradas con el PDC resultante de evaluar uno y otro método de cálculo.

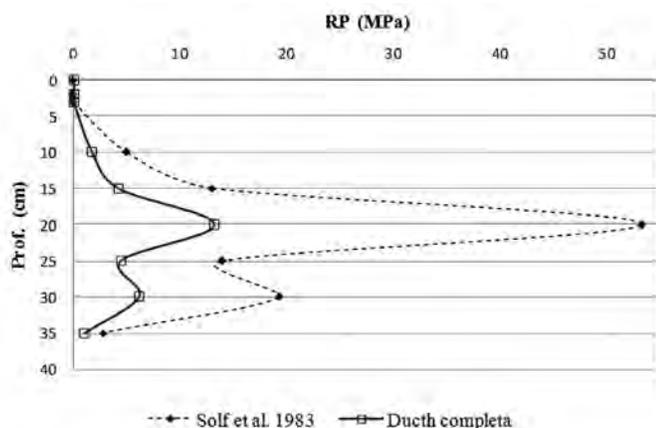


FIGURA 4. Comportamiento promedio en profundidad de los valores de la resistencia a la penetración (RP) calculado para un suelo arenoso de la Mesa de Guanipa empleando ambas formulaciones.

En la formulación de Duchth Completa se trabaja con la penetración por golpes o efectiva que conduce a resultados más aceptados, siendo capaz de reportar al menos un valor de RP. Este valor asociado es de 0,14 MPa y es debido exclusivamente a peso del penetrómetro e identificado con la presión estática (Stolf *et al.*, 2005), siendo igual al peso del equipo ($M + m$) multiplicado por la constante g y dividido entre el área del cono (A).

Mayores precisiones en cuanto a este valor de presión estática se obtendrían a partir de encontrar el valor de la masa mínima bajo la cual el penetrómetro alcanza el equilibrio estático en la capa superficial del suelo. Tales precisiones con el auxilio del PDC usualmente no cuenta dentro de los propósitos de investigación, el cual generalmente está dirigido a obtener información sobre la dinámica en el espacio - temporal tiempo de las propiedades físicas del suelo que determinan la resistencia mecánica.

Nótese que el error medio (EM) global resultante de la comparación entre ambas formulaciones es de 7,42 MPa, siendo la raíz del error cuadrático medio (RECM) de 10,38 MPa, lo cual da idea de la sobreestimación en que se infringe del empleo de Stolf (1983) respecto a la de Duchth Completa. Ello es contrario al reporte de Sun *et al.* (2004), al contabilizar que la sobreestimación de los valores de la RP medida con un penetrómetro estático de cono, tomado como referencia, es mayor que la propia incertidumbre encontrada entre dos formulaciones de cálculo (Duchth completa y simplificada). Obviamente se trata en este caso de dos formulaciones homologas, que solo difieren en una constante (valor de la presión estática) como se demuestra por Stolf *et al.* (2005).

Se debe apuntar que mediante el mapa de la Figura 5 se persigue el propósito de mostrar las principales tendencias de esta propiedad en el área experimental con vista a la toma de decisiones en ulteriores manejos y medidas de recuperación del suelo. Los valores del mapa contrastan con los de la Figura 4, ciertamente son ligeramente menores. Ello se explica debido a que la técnica de interpolación empleada (Kriging) tiene asociado el hecho que suaviza la distribución de una población estadística (Chirico *et al.*, 2007). No obstante, es una técnica universalmente empleada y aceptada para explicar las principales tendencias de las variaciones espaciales de las propiedades del suelo.

Desde el punto de vista de su comportamiento espacial, las

mayores resistencias a la penetración, superiores a los 5 MPa, se localizan en la dirección norte de área y a profundidades entre los 20 y 30 cm, lo cual está asociado a la maquinaria como tal y a su correspondencia con la zona de viraje en este extremo de la parcela, recayendo el peso del apero sobre el eje del tractor generando en este caso compactación del suelo por rodadura. Ello se ve intensificado durante el período lluvioso, el de mayor actividad agrícola.

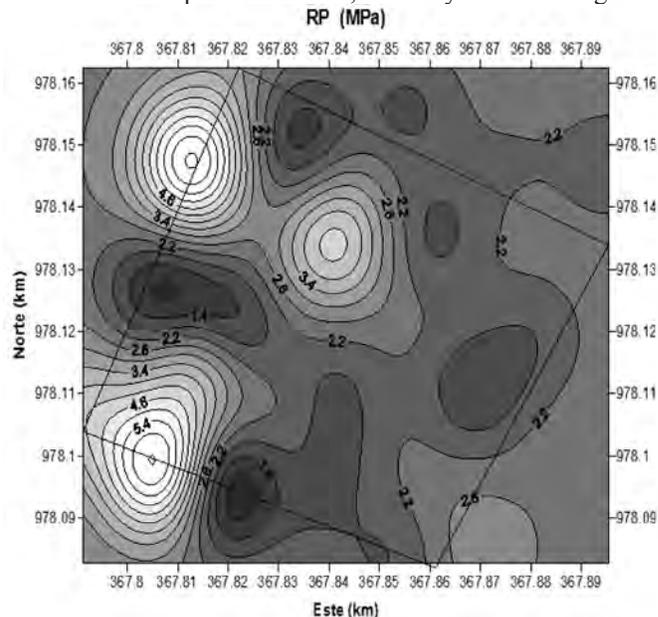


FIGURA 5. Mapa de la resistencia a la penetración promedio a los 20 cm del suelo de la parcela experimental calculados mediante la formulación de Duchth completa (Stolf *et al.*, 2005).

Al igual que para la densidad aparente D_a , se maneja un valor de resistencia crítica en función en este caso de la relación entre la presión efectuada por las raíces y lo medido con el penetrómetro, la cual es dependiente del contenido de arcilla inherente al suelo en cuestión. Según Chaudhari *et al.* (2013), para un suelo arenoso con porcentajes de la fracción arcilla entre el 5 y el 10 %, como el de estudio, se le atribuye un valor de RP crítica de 7,2 MPa, el cual se satisface en varios de los sitios muestreados entre los que clasifican los espacialmente descritos antes. Los límites declarados para la RP crítica para disímiles suelos y cultivos (van desde 2 hasta 6 MPa), reafirmandose y tipificando con ello el resultado obtenido.

Todo ello sin obviar que es consabido que lo registrado por el PDC u otros similares suelen ser mayores a los valores de RP que experimenta una raíz creciendo en el mismo suelo, por su capacidad de adaptabilidad. En ello pesa que los registros del penetrómetro llevan implícito una sobreestimación de la impedancia del suelo, una vez que no discriminan del valor que registra la sonda cónica del correspondiente a la fuerza de fricción entre el vástago del equipo y el suelo. La magnitud de esta fuerza adicional registrada es dependiente de la relación entre la longitud y el diámetro del vástago en contacto con el suelo y el área de la base del cono (Ramos *et al.*, 2014).

A favor del PDC empleado se debe apuntar que Nacci y Pla (1992) estudiaron la resistencia mecánica de suelos venezolanos utilizando prototipos de equipos de penetrometría desarrollados y construidos en el país, concluyéndose que el penetrómetro

de impacto puede ser utilizado tan efectivamente como el más costoso que incluya registros automáticos y computarizados.

CONCLUSIONES

- El número de golpes registrado con el PDC experimenta una tendencia a aumentar con la profundidad, destacándose su aumento notable a partir de los 15 cm, donde se registran alrededor de 25 golpes promedio al pasar desde los 10 a los 15 cm, sin embargo al pasar de los 20 y 30 cm se pasa de más de 90 a 100. En ese sentido, los valores de resistencia a la penetración de la parcela mecanizada se incrementan notablemente a partir de los 15 y hasta los 30 cm, con sus valores máximos a los 25 cm, siendo las profundidades mayores inaccesibles por el penetrómetro a causa de la elevada impedancia mecánica del suelo ligada a las prácticas mecanizadas. Una limitante experimental y valorativa adicional está asociada a la masa de impacto del penetrómetro empleado,

la dureza del suelo y su imposibilidad de explorar la RP del suelo a mayores profundidades. No obstante, a estas profundidades no cabe duda que el valor de RP es alto y mucho mayor que el valor inmediato anterior que fue registrado por la punta cónica. Los principales elementos que inclinan la balanza a favor de emplear la formulación completa de Dutch es por lado el sustento físico del cual emana su derivación y por otro que refleja de manera más acertada el carácter marcadamente arenoso de este suelo, su estado estructural y la realidad experimental en la cual punta cónica se introduce varios centímetros de profundidad, sin auxilio de la masa de impacto (cero número de golpe).

AGRADECIMIENTOS

Al INIA y a su personal del Laboratorio de Suelo por la colaboración tan oportuna y valiosa, especialmente a la investigadora Ing. María Padrino.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHAUDHARI, P. R., AHIRE, D. V., AHIRE, V. D., CHKRAVARTY, M. Y MAITY, S.: "Soil Bulk Density as related to Soil Texture, Organic", *International Journal of Scientific and Research Publications*, ISSN 2250-5289, 3(2), 45-58, 2013.
- CHIRICO, G.B., MEDINA, H. & ROMANO, N.: "Uncertainty in predicting soil hydraulic properties at the hillslope scale with indirect methods", *J. Hydrol.* DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2005.01.022334 405-422, 2007.
- HERRICK, J.E., JONES, T.L.: "A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance", *Soil Sci. Soc. Am. J.* DOI: 10.2136/sssaj2002.1320, 66: 1320-1324, 2002.
- HOSSNE, A.: "Las rastras de disco y sus perspectivas económicas en Venezuela", *Revista Científica UDO Agrícola Universidad de Oriente*, DOI:10.14214/sf.366, 6(1):41-46, 2006.
- LAMPURLANÉS, J., CANTERO-MARTÍNEZ, C.: "Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth", *Agron. J.* DOI:10.2134/agronj2003.5260, 95: 526-536, 2003.
- NACCIS, Y I. PLÁ.: "Estudio de la resistencia a la penetración de los suelos con equipos de penetrometría desarrollados en el país", *Agronomía Tropical*, ISSN 0002-192X, 42(1-2): 115-132, 1992.
- NÚÑEZ, R., LÓPEZ, V., RICARDO, S. y PAZ, A.: "Estudio de la resistencia de penetración de un suelo Vertisol", *Ciencias Holguín*, ISSN 1027-212, 1: 10-21, 2010.
- RAMOS, E., MARTÍNEZ, A., GARCÍA DE LA FIGAL, A.: Modelo para el cálculo de la resistencia del suelo a la penetración de sondas. Parte I: sondas cónicas, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 23(4): 5-9, 2014.
- STOLF, R., REICHARDT, K., VAZ, C.P.M.: "Response to 'Comments on 'Simultaneous Measurement of Soil Penetration Resistance and Water Content with a Combined Penetrometer-TDR Moisture Probe' and 'A Dynamic Cone Penetrometer for Measuring Soil Penetration Resistance'" *Soil Sci. Soc. Am. J.*, DOI: 10.2136/sssaj2005.0926., 69(3):926, 2005.
- SUN, Y., CHENG, Q., LIN, J., SCHULZE LAMMERS, P., BERG, A., MENG, F., ZENG, Q AND LI, L.: "Energy-based comparison between a dynamic cone penetrometer and a motor-operated static cone penetrometer" *Soil and Tillage Research*, ISSN: 0167-1987, 115-116: 105-109, 2011.
- CHANGHO L, KYU-SUN K., WONTAEK, W. & WOOJIN, L.: "Soil Stiffness Gauge (SSG) and Dynamic Cone Penetrometer (DCP) tests for estimating engineering properties of weathered sandy soils in Korea", *Engineering Geology*, ISSN: 0013-7952, 169: 91-99, 2014.
- VANAGS, C., MINASNY, B. & MCBRATNEY, A. B.: 2004. *The dynamic penetrometer for assessment of soil mechanical resistance [en línea] 2004*, Disponible en: <http://www.regional.org.au/au/asssi/super/soil2004/s14/poster/1565> [Consulta: 20 febrero 2015].
- VAZ, C.M.P., HOPMANS, J.W.: "Simultaneous measurements of soil penetration resistance and water content with a combined penetrometer-TDR moisture probe", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, DOI: 10.2136/sssaj2001.651, 65: 4-12, 2001.
- WEBSTER, R., OLIVER, M.A.: *Statistical Methods in Soil and Land Resource Survey*, 316pp., Oxford University Press, ISBN: 0 19 823317 5, Oxford, USA, 1990.

Recibido: 22/09/2015.

Aprobado: 01/4/2016.

Publicado: 30/4/2016.

Jorge García Coronado, Profesor, Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, Autopista Nacional km 231/2 y carretera de Tapaste, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. Correo electrónico: jgarcia@unah.edu.cu

María E. Ruíz Pérez, Correo electrónico: mruizperez@gmail.com

Pablo M. Hernández Alfonso, Correo electrónico: phernand@unah.edu.cu

Vilma Toledo Diepa, Correo electrónico: vilma@unah.edu.cu

Francisco Salguero Santana, Correo electrónico: salguero@unah.edu.cu

Nilda L. Castillo, Correo electrónico: jgarcia@unah.edu.cu