

REVISIÓN

Sensoramiento continuo de la compactación del suelo: revisión y análisis

On-the-go soil compaction sensing: review and analysis

Darina Lara Coba¹; Miguel Herrera Suárez² y Ciro E. Iglesias Coronel³

RESUMEN. Dada la significación que tiene el conocimiento del estado de compactación del suelo como una de las variables que mayor importancia tiene a la hora de elaborar las estrategias de manejo del suelo, así como las ventajas que brinda el uso de los sensores para la medición continua de la compactación del suelo, el presente trabajo tiene como objetivo analizar críticamente la situación actual del sensoramiento continuo de la compactación del suelo. El primer apartado estará dirigido a analizar el desarrollo actual de los métodos empleados en el sensoramiento de la compactación del suelo. Posteriormente se analizan las particularidades de los diferentes tipos de sensores que se han desarrollado para la determinación continua de la compactación del suelo. Finalmente se analizan las particularidades de los modelos empleados para correlacionar los datos de salida del sensor con la compactación del suelo. Como resultado se muestra el estado del arte acerca del sensoramiento continuo de la compactación del suelo.

Palabras clave: propiedades del suelo, densidad aparente, índice de cuña, índice de cono.

ABSTRACT. Given the significance of soil compaction status as one of the most important variables to develop soil management strategies, as well as the advantages associated with the use of sensors for soil compaction measurement. This paper aims to review and analyze critically the current situation of **ON-The-Go** soil compaction sensing. The first part is aimed at analyzing the current development of the methods used in the soil compaction sensing. Then, to analyze the characteristics of the sensors that have been developed for the soil compaction determination (**on-the-Go**). Finally, we analyzed the characteristics of the models used to correlate the sensor output data with soil compaction. The result shows the state of the art on the sensing **On-the-go** soil compaction.

Keywords: Soil properties, bulk density, wedge index, cone index.

INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso esencial para el desarrollo económico-social y sostén físico y químico de todos los ecosistemas terrestres. La Carta Mundial de los suelos aprobada por la FAO, (Italia, 1982), establece que entre los factores que provocan su degradación física se encuentra la compactación, la cual ha sido considerada además como una de las principales causas de degradación del suelo, reportándose un área de 68 000 000 ha compactadas a nivel mundial. La compactación del suelo es la densificación o reducción del volumen del espacio poroso, lo cual está asociado a cambios en la estructura del suelo y usualmente al incremento de las tensiones, así como la reducción de la conductividad hidráulica, esta causa problemas en la producción de los cultivos. Existen dos tipos principales de compactación: la superficial que se produce a poca profundidad y es

provocada fundamentalmente por el tráfico de las máquinas menos pesadas, como las empleadas en la mejora y acondicionamiento del terreno; la profunda es causada por el tráfico de la maquinaria pesada, alcanzando profundidades hasta el nivel del subsuelo, (Euskadi, 2008). La compactación del suelo es potencialmente la mayor amenaza para la productividad agrícola. A medida que se incrementa la compactación disminuye el espacio poroso, especialmente a nivel de los macroporos, los cuales están ocupados por el agua útil. La infiltración también se ve afectada pues disminuye la permeabilidad de la capa compactada. Cuando la compactación ocurre en la capa superficial se produce un incremento de la escorrentía disminuyendo la capacidad de filtración del agua.

Por la significación que tiene el conocimiento del estado de compactación del suelo como una de las variables que mayor importancia tiene a la hora de elaborar las estrategias de manejo del suelo, se desarrollan sensores capaces de determinar las

Recibido 19/01/10, aprobado, 12/06/11, trabajo 38/11, Revisión

¹ Ing., Prof. Instructor., Universidad de Granma, Departamento de Mecanización, Granma. E-✉: d.lara@udg.co.cu

² Dr. C., Prof. Titular, Universidad Central de Las Villas. Dpto. Mecanización Agropecuaria, Villa Clara, Cuba, CP 54830

³ Dr. C., Prof. e Investig. Titular, Universidad Agraria de La Habana-CEMA, Mayabeque, Cuba. CP: 32700.

diferentes propiedades del suelo, de forma continua y en tiempo real, recolectando una amplia gama de mediciones de gran utilidad para el posterior manejo en sitio específico del suelo, garantizando su mejoramiento puntual y localizado (Owen *et al.*, 1987; Stafford y Hendrick, 1988; Glancey *et al.*, 1989). Numerosos investigadores y fabricantes han desarrollado sensores para la medición continua (On-the-Go) de las propiedades del suelo, (Hummel *et al.*, 1996; Sudduth *et al.*, 1997; Adamchuk, 2004). A partir de esto se han diseñado varios sensores para la medición continua de las propiedades del suelo. Los principales métodos de mediciones de estos sensores, son: eléctricos y electromagnéticos, ópticos y radiométricos, mecánicos, acústicos, neumáticos y electroquímicos. En función de los métodos de medición se han desarrollado una gran variedad de prototipos de sensores, los más aceptados son los que basan su principio de funcionamiento en la medición de resistencia mecánica del suelo, ya sea en todo el perfil del suelo o en una profundidad dada. Estas lecturas de la resistencia mecánica son utilizadas posteriormente para estimar la compactación del suelo. La totalidad de los diseños de estos sensores son funcionales y permiten la medición continua de la compactación con mayor o menor grado de exactitud en las estimaciones, dependiendo estas de las relaciones que se establecen para correlacionar los datos de salida del sensor con el estado físico del suelo. Por lo que el problema actual del sensoramiento no se centra en la geometría y diseño del sensor sino en la búsqueda de dichas relaciones. Tomando en cuenta estos aspectos el **objetivo** del trabajo es analizar el estado actual del sensoramiento continuo de la compactación del suelo.

DESARROLLO

A partir del desarrollo de los primeros prototipos de sensores para la determinación continua de la compactación del suelo se han llevado un sin número de investigaciones dirigidas a la mejora del diseño y funcionamiento del sensor, así como la búsqueda de relaciones matemáticas que permitan la estimación de la compactación del suelo.

Métodos empleados en el sensoramiento de la compactación del suelo

Para el sensoramiento continuo de la compactación del suelo se han empleado varios métodos, el más aceptado es el que basa su principio de funcionamiento en la medición de resistencia mecánica del suelo, ya sea en todo el perfil del suelo o en una profundidad dada. Estas lecturas de la resistencia mecánica son utilizadas posteriormente para estimar la compactación del suelo.

Para el diseño de estos sensores se toma como referencia la idea original desarrollada por Glancey *et al.* (1989), es decir, instrumentar un órgano de trabajo de un apero de labranza para el sentido de la compactación. En la mayoría de los casos el órgano de trabajo que interactúa con el suelo, se compone por una cuchilla plana, dispuesta a 90 grado con la vertical y tienen como característica común que son herramientas estrechas, donde la profundidad de trabajo es mayor que el ancho, (Figura 1).

En otros casos como es el del sensor desarrollado por Mouazen *et al.* (2003a) simplemente se instrumenta un escarificador convencional, que de conjunto con un celda de carga actúan como sensor de la resistencia mecánica del suelo, (Figura 2).

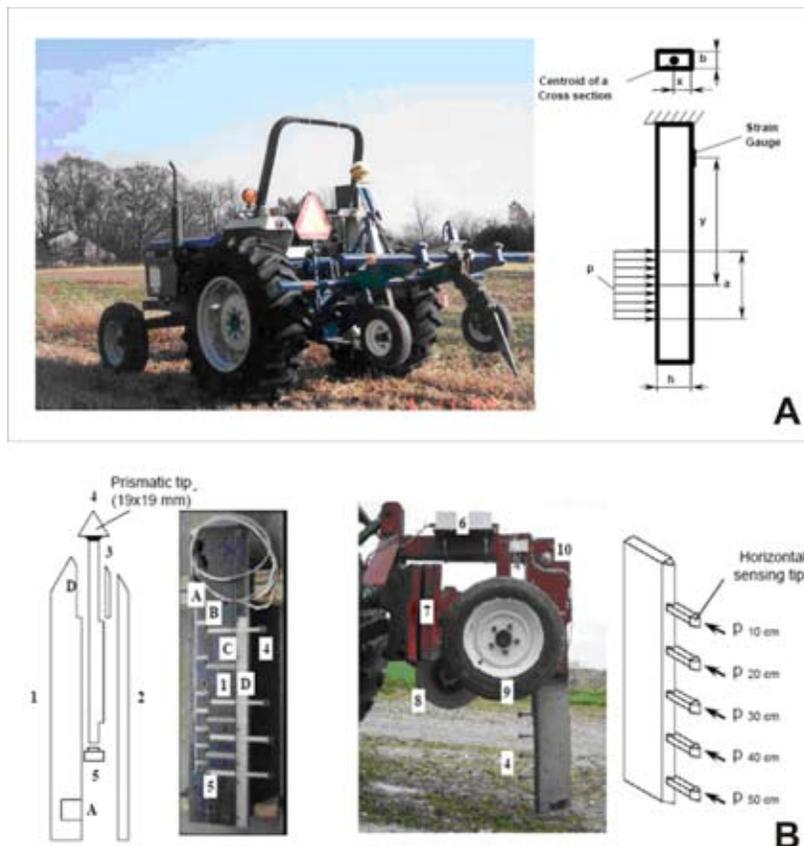


FIGURA 1. Sensores de compactación. a) con galgas extensométricas; b) con puntas prismáticas, (Adamchuk *et al.*, 2001; Chung *et al.*, 2003).

Dentro de los sensores que estiman la compactación del suelo a partir de la medida de su resistencia mecánica se han desarrollado variantes en función del método a emplear para el sensado de la resistencia del suelo, siendo el más común el empleo de una celda de carga que trabaja como una viga en cantiléver al ser flexionada por el órgano de trabajo cuando este interactúa con el suelo, (Adamchuk *et al.*, 2001; Mouazen *et al.*, 2003a; Hall y Raper, 2005; Martínez *et al.*, 2009).



FIGURA 2. Sensor que posee una celda de carga que trabaja como una viga en cantiléver, (Mouazen *et al.*, 2003a).

Otros dispositivos parten de la disposición de strain gauge en el órgano de trabajo, de forma tal que traducen las deformaciones de este en los esfuerzos de resistencia mecánica del suelo, para finalmente correlacionarla con la compactación (Figura 1a). También se han empleado transductores octagonales de anillos extendidos como elemento para la captación de los esfuerzos (Mouazen y Ramon, 2006; Abbaspour-Gilande, 2009; Pitla *et al.*, 2009; Herrera *et al.*, 2011), de manera similar investigadores de la Universidad de California Davis, han utilizado indistintamente celdas de carga de forma rectangular y de anillos octagonales, posibilitando estos últimos un mayor aprovechamiento del espacio en función de reducir la dimensiones del sensor (Andrade *et al.*, 2001; Andrade *et al.*, 2002).

Otro método utilizado para localizar las capas compactas del suelo es el método acústico, a partir de lo cual Tekeste *et al.* (2002) desarrollaron un órgano de trabajo dotado de un dispositivo en forma de cono que es introducido en el suelo para la medición de la propagación del sonido, Fig. 3. Este es un método empírico que se basa en la relación existente entre la amplitud de las ondas de sonido en un cierto rango de frecuencia, con el grado de compactación del suelo expresado en magnitudes equivalentes al índice de cono y la densidad volumétrica.

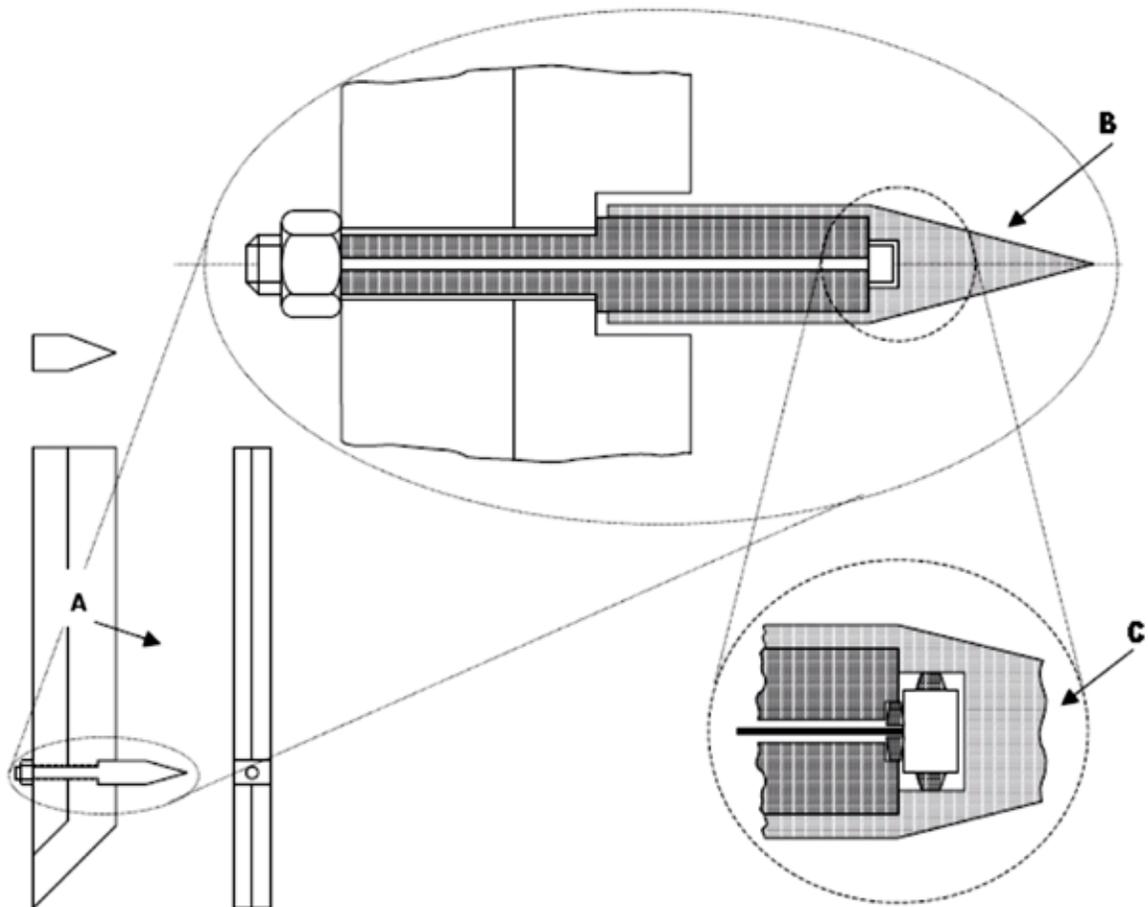


FIGURA 3. Sensor acústico con punta cónica, (Tekeste *et al.*, 2002).

Particularidades de los sensores desarrollados para la determinación On-the-Go de la compactación del suelo

La mayoría de los sensores desarrollados comprenden en la concepción de su diseño el empleo de un órgano de trabajo en forma de cuchilla plana, dispuesto verticalmente, perpendicular a la superficie del suelo es decir a 90 grado, (Adamchuk *et al.*, 2001). Las caras laterales pueden estar acunadas, o no, con un ángulo de inclinación que toma valores aproximadamente 60 grado (Figura 4). La tendencia es a reducir el área frontal del órgano en la zona cercana a la punta para reducir el momento relativo asociado con la resistencia del suelo en esta zona, se prefieren ángulos de afilado de la cara frontal de la herramienta que interactúa directamente con el suelo $\alpha=45$ grado, el ángulo de inclinación de la cara frontal es $\beta=1$ grado, (Adamchuk *et al.*, 2001). Las dimensiones preferidas de la sección frontal muestran, que el espesor mínimo en la parte inferior de la punta toma dimensiones aproximadas de $b_{\min}=0,0085$ m, y la parte superior $b_{\max}=0,01587$ m, (Adamchuk *et al.*, 2001).

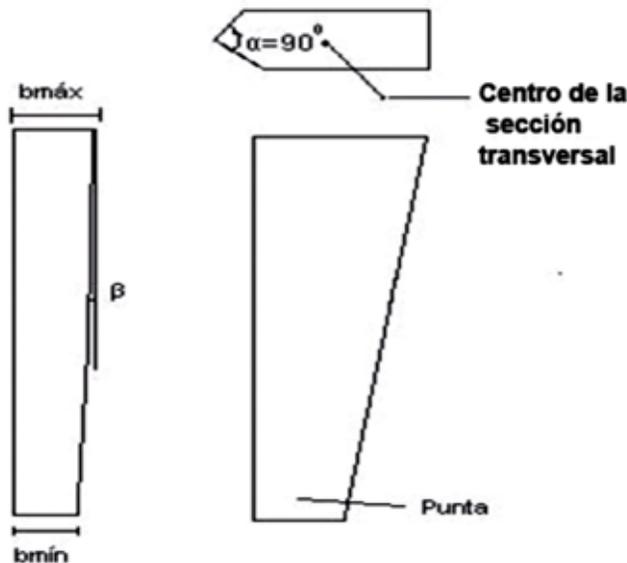


FIGURA 4. Dimensiones preferidas de los órganos de trabajo de los sensores en forma de cuchilla plana. (Adamchuk *et al.*, 2001).

Buscando la equivalencia con la forma de medir la resistencia mecánica del suelo con los penetrómetros de cono, se ha incluido en los diseños la colocación de puntas en la zona de interacción del sensor con el suelo, que pueden tener forma cónica o de cuñas prismáticas. Las mediciones de la resistencia mecánica del suelo con ambos tipos de puntas se afectan con el cambio de las propiedades físicas del suelo. Según Hall y Raper (2005), tanto las dimensiones de la punta, como la posición de colocación de esta con respecto a la cara frontal del sensor, son determinantes en la exactitud de la mediciones, la longitud de las cuñas prismáticas a partir de la parte frontal del soporte debe ser 0,03 m y el ancho 0,05 m. Martínez *et al.* (2009), afirman que el empleo de cuñas con desplazamiento horizontal ha sido exitoso, sin embargo no se han obtenido altas correlaciones entre el índice de cuña y el índice de cono, lo

que puede deberse a un diseño inadecuado de las cuñas, pues dichos autores demostraron teóricamente que el ángulo de la cuña deberá ser inferior al del cono en esa misma proporción, si se pretende obtener resultados homólogos en ambos indicadores, esto se debe a que producto de una velocidad mayor del desplazamiento de la cuña, el coeficiente de fricción dinámico del par cuña-suelo es inferior al correspondiente par cono-suelo.

La necesidad de determinar de manera simultanea las variables necesarias para correlacionar la lectura del sensor con la compactación del suelo, ha dado lugar al desarrollo de sensores multipropósitos, que son capaces de sensar de manera simultanea la resistencia mecánica del suelo, humedad y textura del suelo, entre otras, además de los parámetros de operación del sensor (velocidad y profundidad de trabajo), ejemplo de estos son los sensores desarrollados por Glancey *et al.* (1996); Liu *et al.* (1996); Mouazen *et al.* (2003a).

La mayoría de las variantes de diseño satisfacen los objetivos de determinar de forma continua la compactación del suelo, el grado de exactitud en las predicciones depende fundamentalmente de la influencia que ejercen las condiciones del suelo y los parámetros del sensor, quedando relegados a un segundo plano los aspectos relacionados con el diseño del sensor.

Análisis de las relaciones entre las lecturas del sensor y las variables que influyen sobre estas

Los parámetros de operación que se tienen en cuenta durante el sensado de la compactación, son: la profundidad, el ancho y la velocidad de trabajo. Según Andrade *et al.* (2002) las velocidades de trabajo deben estar entre 1,65 a 1,25m/s⁻¹, según (Andrade *et al.* (2002), la velocidad de trabajo ejerce poca influencia en las predicciones, sin embargo Chung *et al.* (2004) plantean que la velocidad de operación del sensor influye en la predicción de la compactación, definiendo la existencia de una velocidad crítica 1,5 ms⁻¹.

De igual forma Andrade *et al.* (2002), define que la profundidad efectiva de sensado debe estar entre 0,1 a 0,45 m. Contrario a esto, los resultados experimentales obtenidos por Hall y Raper (2005) evidencian que la profundidad efectiva máxima de trabajo durante el sensado de la compactación es de 0,6 m.

Las variables humedad, textura y densidad del suelo también ejercen gran influencia sobre predicción de la compactación del suelo, siendo el contenido de humedad la variable que mayor significación tiene en la exactitud de la predicciones (Andrade *et al.*, 2001; Mouazen *et al.*, 2003a; Hall y Raper, 2005).

Tomando en cuenta estos aspectos varios investigadores han desarrollado ecuaciones que le permiten correlacionar las lecturas del sensor con la magnitud de la compactación del suelo medida a partir de la densidad aparente, en las que incluyen tanto las variables de operación del sensor como las caracterizan su estado físico, siendo un factor determinante las características del sensor y su principio de funcionamiento. A partir de esto Andrade *et al.* (2002) desarrollan una ecuación

ción para predecir el estado de compactación del suelo, correlacionando la fuerza requerida para el corte del suelo con la densidad seca, en dicha ecuación se incluye la humedad como una importante variable que define el estado del mismo, así como la profundidad y el ancho de trabajo. Esta ecuación fue empleada con éxito en suelos de diferente textura (arenosos, loamosos y arcillosos).

De forma análoga y basándose en una combinación de la simulación de la interacción suelo-herramienta de labranza mediante el método de elementos finitos con el uso de la estadística, Mouazen *et al.* (2003a) desarrollaron un modelo híbrido matemático para la estimación de la compactación del suelo, a partir de la correlación de la densidad volumétrica con la fuerza que se opone al corte del suelo cuando es interactuado por el sensor. Esta ecuación fue válida inicialmente para un suelo arenoso loamoso e incluyó al contenido de humedad del suelo como variable que caracterizan su estado, además de la profundidad de trabajo como parámetro de operación del sensor. Posteriormente dicha ecuación fue modificada empíricamente, a partir de la adición de un factor de corrección que permite disminuir el error promedio de las predicciones (Mouazen *et al.*, 2003b).

Finalmente en función de extender la aplicación del sistema de medición continua de la compactación a suelos de diferentes texturas, Mouazen y Ramon (2009) experimentaron y validaron dichas ecuaciones para suelos limosos, loamosos, y limosos loamosos. Los resultados de estas investigaciones dieron lugar al desarrollo de nuevos factores de corrección y la introducción del contenido de arcilla como otra variable que define el estado del suelo, en este caso específico su textura. Se demostró que la humedad ejerce un significativo efecto en el factor de corrección, y que el contenido de arcilla tiene efectos moderados en dicho factor de corrección. Hasta el momento no se tienen indicios de la validez de estos modelos en suelos arcillosos.

La mayoría de los investigadores que han trabajado en el sensoramiento continuo de la compactación del suelo han correlacionado los datos de salida del sensor con el índice de cono, siendo esta última variable la que define la magnitud de la compactación del suelo.

Andrade *et al.* (2002), obtuvieron experimentalmente modelos que muestran una buena correlación entre la salida del sensor y el índice de cono para suelos arcillosos, loamosos y arenosos. De igual forma Adamchuk *et al.* (2001) obtuvieron buenas correlaciones entre las salidas del sensor y las mediciones del penetrómetro de cono, para diferentes intervalos de profundidad. Sin embargo, las mediciones del penetrómetro de cono representan estimaciones de puntos máximos de resistencia a la penetración y los datos del sensor son el prome-

dio de la resistencia del suelo (Adamchuk *et al.*, 2001). A pesar de esto Adamchuk *et al.* (2006), compararon dos métodos mecánicos de sensoramiento continuo en el mismo campo, obteniendo que la correlación correspondiente a las estimaciones producidas por cada sensor con las lecturas del penetrómetro de cono no fueron adecuadas, aun cuando se relacionaron las mediciones de un sensor con el otro.

Otros investigadores como Hall y Raper (2005), que han desarrollado sensores con puntas prismáticas prefieren correlacionar el índice de cono obtenido con el penetrómetro de cono, con un índice de cuña determinado a partir de afectar la resistencia del suelo medida por el sensor con el área de la cuña o punta prismática. La exactitud de estas correlaciones está en función de las dimensiones de las puntas prismáticas o cuña, en este caso entra a jugar un papel fundamental el par de fricción suelo-cuña.

De estas variantes de correlación de las lecturas del sensor con la compactación del suelo se considera más adecuada la que toma en cuenta la densidad volumétrica del suelo como medida del estado de compactación del mismo, pues la exactitud de las lecturas del penetrómetro de cono están altamente condicionadas por el estado físico del suelo, donde intervienen variables como el contenido de humedad, textura, e historia de manejo, variables que no se incluyen en los modelos que se basan en este método para correlacionar la salida del sensor con la compactación del suelo.

CONCLUSIONES

- La problemática actual del sensoramiento continuo de la compactación no se centra en el diseño de los sensores, o la búsqueda de sus parámetros racionales, si no en el desarrollo de relaciones que permitan correlacionar con exactitud las lecturas del sensor con el estado de compactación del suelo, tomando en cuenta su estado físico y naturaleza.
- El tipo de sensor más adecuado para la determinación continua de la compactación del suelo en las condiciones de la agricultura cubana es el mecánico, debido a su sencillez tecnológica y bajos costos de fabricación.
- Se han obtenido resultados más exactos en la estimación de la compactación del suelo, mediante la correlación de las lecturas del sensor con la densidad volumétrica, en comparación con la medida del índice de cono;
- Las variables que definen el estado del suelo que mayor influencia tienen en las predicciones de la compactación del suelo son la humedad y el contenido de arcilla, así como la profundidad y ancho de trabajo como parámetros de operación del sensor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASPOUR-GILANDEH, Y.: "On-the-go soil mechanical strength measurement at different soil depths", *Agriculture & Environment*, 7(3&4): 696-699, 2009.
- ADAMCHUK, V. I.: "On-the-go soil sensors for precision agriculture", *Computers and Electronics in Agriculture*, 44: 71-91, 2004.

- ADAMCHUK, V. I.; M. T. MORGAN and H. SUMALI: "Application of a strain gauge array to estimate soil mechanical impedance on-the-go", *Transactions of the ASAE*, 44(6): 1377-1383, 2001.
- ADAMCHUK, V. I.; K. A. SUDDUTH; T. J. INGRAM and S. O. CHUNG: *Comparison of Two Alternative Methods to Map Soil Mechanical Resistance On-the-Go* En: ASABE Paper Number: 061057, 9 - 12 July, pp. 2006.
- ANDRADE, P.; U. ROSA; S. UPADHYAYA; B. JENKINS; J. AGUERA and M. JOSIAH: *Soil profile force measurements using an instrumented tine* En: ASAE Paper No. 011060, July 28-August 1, pp. 2001.
- ANDRADE, P.; S. K. UPADHYAYA; B. M. JENKINS and F. A. GARCIA S: *Evaluation of the UC Davis Compaction Profile Sensor*. En: ASAE Paper Number: 021185, 28-31 July 2002, pp. 2002.
- CHUNG, S. O.; K. A. SUDDUTH and J. W. HUMMEL: "On-the-go soil strength profile sensor using a load cell array", *ASAE Paper No. 031071*: 2003.
- CHUNG, S. O.; K. A. SUDDUTH; C. PLOUFFE and N. R. KITCHEN: *Evaluation of an On-the-go Soil Strength Profile Sensor Using Soil Bin and Field Data*. En: ASAE Paper Number: 041039, 1 - 4 August, pp. 2004.
- EUSKADI: *Red de portales de la Administración de la Comunidad Autónoma del País Vasco. Compactación del suelo [en línea] mayo 26 2008. Disponible en: http://www.euskadi.net/r33-2288/es/contenidos/informacion/suelo/es_1044/compactacion.html [Consulta: octubre 14 2010]*.
- GLANCEY, J. L.; S. K. UPADHYAYA; W. J. CHANCELLOR and J. W. RUMSEY: "An instrumented chisel for the study of soil-tillage dynamics", *Soil & Tillage Research*, 14: 1-24, 1989.
- GLANCEY, J. L.; S. K. UPADHYAYA; W. J. CHANCELLOR and J. W. RUMSEY: "Prediction of agricultural implement draft using an instrumented analog tillage tool", *Soil & Tillage Research*, 37: 47-65, 1996.
- HALL, H. E. and R. L. RAPER: "Development and concept evaluation of an on-the-go soil strength measurement system", *American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 48 (2): 469-477, 2005.
- HERRERA, S. M.; C. C. IGLESIA; C. D. LARA; C. O. GONZÁLEZ y B. E. LÓPEZ: "Desarrollo de un sensor para la medición continua de la compactación del suelo", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(1): 6-11, 2011.
- HUMMEL, J. W.; L. D. GAULTNEY y K. A. SUDDUTH: "Soil property sensing for site-specific crop management", *Computers and Electronics in Agriculture*, 14(2-3): 121-136, 1996.
- ITALIA, FAO: *Carta mundial de los suelos*, Roma, 1982.
- LIU, H.; S. K. UPADHYAYA; T. KATAOKA y S. SHIBUSAWA: Development of a texture/soil compaction sensor. En: **Third International Conference on Precision Agriculture**, pp. 617-630, Madison, Wisconsin, 1996
- MARTÍNEZ, R. A.; C. E. RAMOS; D. L. F. C. A. GARCÍA y P. Y. RIVERO: Fundamentación tórica para el diseño de cuñas como objeto de la medición del índice de cuña del suelo. En: **Agrocentro**, Santa Clara, Villa Clara, Cuba, 2009.
- MOUAZEN, A. M.; K. DUMONT; K. MAERTENS and H. RAMON: "Two - dimensional prediction of spatial variation in topsoil compaction of a sandy loam field based on measured horizontal force of compaction sensor, cutting depth and moisture content.", *Soil & Tillage Research*, 74(1): 91-102, 2003b.
- MOUAZEN, A. M. and H. RAMON: "Development of on-line measurement system of bulk density based on on-line measured draught, depth and soil moisture", *Soil & Tillage Research*, 86(2): 218-229, 2006.
- MOUAZEN, A. M.; H. RAMON and J. BAERDEMAEKER: "Modelling Compaction from On-line Measurement of Soil Properties and Sensor Draught", *Precision Agriculture*, 4(2): 203-212, 2003a.
- MOUAZEN, M. A. and H. RAMON: "Expanding implementation of an on-line measurement system of topsoil compaction in loamy sand, loam, silt loam and silt soils", *Soil & Tillage Research*, 103: 98-104, 2009.
- OWEN, G.; H. DRUMMOND; L. COBB and R. J. GODWIN: "An instrumentation system for deep tillage research", *Transactions of the ASAE*, 30(6): 1726-1733, 1987.
- PITLA, S. K.; L. G. WELLS and S. A. SHEARER: "Integration of an extended octagonal ring transducer and soil coulterometer for identifying soil compaction", *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 25(5): 647-652 2009
- STAFFORD, J. V. and J. G. HENDRICK: "Dynamic sensing of soil pans", *Trans. ASAE*, 31(1): 9 - 13, 1988.
- SUDDUTH, K. A.; J. W. HUMMEL and S. J. BIRRELL: *Sensors for sitespecific management*, In: *The State of Site-Specific Management for Agriculture*: 1997.
- TEKESTE, M. Z.; T. E. GRIFT y R. L. RAPER: *Acoustic Compaction Layer Detection*. En: ASAE Paper Number: 021089, July 28-July 31, pp. 2002.