



EXPLORACIÓN Y PROCESOS MECANIZADOS *OPERATION AND MECHANIZED PROCESSES*

Desarrollo de un sensor para la medición continua de la compactación del suelo

Development of a Sensor for Soil Continuous Compaction Measurement

Miguel Herrera Suárez¹; Ciro Iglesias Coronel²; Darina Lara Coba³; Omar González Cueto⁴ y Elvis López Bravo⁴

RESUMEN. La repercusión económica y ambiental de la compactación de los suelos agrícolas ha propiciado el desarrollo de nuevos medios y métodos para combatirla, por lo que el presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un sensor para la medición continua de la compactación del suelo. Dicho sensor está conformado por un transductor octagonal de anillos extendidos (EORT), acoplado a un órgano de trabajo del tipo escarificador alado. La resistencia o impedancia mecánica del suelo es medida por el transductor, para posteriormente correlacionarla con su estado de densificación o compactación. Finalmente el funcionamiento del transductor desarrollado se comprobó en las condiciones controladas del canal de suelo CS-CEMA-25, ubicado en el Centro de Investigaciones Agropecuarias (CEMA), de la Universidad Agraria de La Habana (UNAH), mostrándose un adecuado funcionamiento del sensor, que lo hace apto para la determinación continua de la compactación del suelo. Los errores en las predicciones de la compactación del suelo oscilaron de 1,50 a 4,16%, quedando demostrado que la exactitud en las predicciones dependerá de las condiciones físicas del suelo y la aptitud de las ecuaciones de predicción empleadas.

Palabras clave: sensor; compactación; densidad volumétrica; sensoramiento continuo; canal de suelo.

ABSTRACT. The economic and environmental repercussion of the agricultural soils compaction has propitiated the development of new means and methods to avoid it, for what the present work has as objective to develop a sensor for soil compaction continuous determination. This sensor is conformed by an extended octagonal rings transducer (EORT), coupled to a tillage tool type winged subsoiler. The soil resistance or mechanical impedance measured by the transducer is later correlated with soil density or compaction state. Finally the developed transducer was tested under controlled conditions using the soil bin CS-CEMA-25, located in the Center of Agricultural Investigations (CEMA), at Agrarian University of Havana (UNAH), showing a sensor appropriate operation that makes it capable for the continuous determination of the soil compaction. The errors during soil compaction predictions oscillated from 1,50 to 4,16%, being demonstrated that the accuracy in the predictions will depend on soil physical conditions and the aptitude of the used prediction equations.

Keywords: sensor; soil compaction; Bulk density; on-the-go soil sensor; soil bin.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico sobre todo el de las ciencias informáticas da paso al surgimiento de las tecnologías de la agricultura de precisión, las cuales están orientadas al manejo de los factores que afectan el rendimiento de los cultivos desde una perspectiva particular, poniendo énfasis en cada sector específico del terreno (Helle y Von Conta, 2006). Esta tecnología está indisolublemente ligada al desarrollo de sensores

para la determinación remota o en tiempo real (en sitio específico) de los diferentes factores que afectan los rendimientos de los cultivos.

Muchos de estos sensores están acoplados a un sistema de posicionamiento global (GPS), para obtener los mapas de las diferentes variables medidas. Los datos de salida vienen siendo una gran fuente de información que refleja la variabilidad espacial de los factores determinados, sugiriendo en la mayoría de los casos la necesidad de adoptar las tecnologías

Recibido 17/12/09, aprobado 12/11/10, trabajo 01/11, investigación.

¹ Dr. C., Prof. Titular, Universidad Central de Las Villas, Dpto. Mecanización Agropecuaria, Villa Clara. CP 54830, E-✉: miguelhs@uclv.edu.cu

² Dr., Prof. e Inv. Titular, Universidad Agraria de La Habana-CEMA, Mayabeque, CP: 32700.

³ Ing., Prof. Asistente., Universidad de Granma, Villa Clara, Departamento de Mecanización.

⁴ MSc., Prof. Auxiliar, Universidad Central de Las Villas, Dpto. Mecanización Agropecuaria, Villa Clara.

de manejo en sitio específico y dosificación variable.

Dentro de los factores que mayor incidencia tienen en los rendimientos de los cultivos se destacan los relacionados con las propiedades del suelo, ya sean las que denotan su estado físico, químico, o mecánico. En función de esto, ya desde finales de la década de los años 80 (pasado siglo) se inicia el desarrollo de sensores capaces de determinar las 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 and Hendrick, 1988; Glancey *et al.*, 1989). Según Adamchuk *et al.*, (2004), una de las principales limitaciones que posee actualmente la agricultura de precisión es la imposibilidad de obtener en muchos casos las propiedades del suelo a un bajo costo de tiempo y recursos.

La Agricultura de Precisión ha sido ampliamente difundida y aceptada, incrementando el interés en el uso de sensores para la extracción de información de las variables del suelo y las plantaciones (Andrade *et al.*, 2004). Numerosos investigadores y fabricantes han intentado el desarrollo de sensores para la medición continua (On-the-Go) de las propiedades del suelo, sin embargo solo unos pocos sistemas están comercialmente disponibles, lo cual ha propiciado la búsqueda de nuevos prototipos (Adamchuk *et al.*, 2004). A partir de esto se han diseñado varios sensores para la medición continua de las propiedades del suelo.

Una de las variables que mayor importancia tiene a la hora de conocer el estado del suelo en función de establecer estrategias para el manejo de los cultivos es la compactación del suelo, determinada a través de la medición indirecta o directa de la densidad volumétrica o de la resistencia a la penetración del suelo. Inicialmente la mayoría de los métodos para la determinación de la compactación del suelo se basaban en el empleo de instrumentos de medición *in situ* y puntual de las propiedades del suelo que se relacionan con la compactación. Estos métodos tienen como desventaja la gran laboriosidad que se requiere durante las mediciones, sobre todo cuando el intervalo de mediciones se hace más pequeño lo cual aumenta el número de muestras considerablemente (Kaleita y Tian, 2002).

Estas son razones suficientes para que el sensoramiento de la compactación del suelo sea hoy un problema de corte mundial, por lo que existe una gran cantidad de investigadores que han trabajado en el desarrollo de sensores para la determinación continua y en sitio específico de la compactación del suelo, (Owen *et al.*, 1987; Stafford and Hendrick, 1988; Glancey *et al.*, 1989; Alihamsyah *et al.*, 1990; Van Bergeijk y Goense, 1996; Manor and Clark, 2001; Raper and Hall, 2003; Gorucu *et al.*, 2001; Adamchuk *et al.*, (2001); Tekeste *et al.*, 2002; Andrade *et al.*, 2003; Chung *et al.*, 2003; Verschoore *et al.*, 2003; Adamchuk *et al.*, 2003a,b; Andrade *et al.*, 2004; Chung *et al.*, (2004); Hall y Raper, (2005); Adamchuk *et al.*, (2006a); Mouazen y Ramon, (2006).

A pesar de la importancia del sensoramiento o determinación continua de la compactación del suelo, en Cuba aun no se ha realizado ninguna experiencia práctica que permita

contar con un sensor para la determinación continua de la compactación del suelo. Hasta el momento el único trabajo que se reporta en este sentido es realizado por Martínez y Morejón (2006), donde se realiza el diseño teórico de un sensor, que posee características muy similares al desarrollado por Hall y Raper (2005), es decir el sensor tiene forma de brazo recto con caras inclinadas, provisto de una cuña que al interactuar con el suelo comprime un celda de carga destinada a sensar la resistencia del suelo. Este trabajo a pesar de ser el primer intento por desarrollar un sensor aun no se ha llevado a la práctica.

Tomando en cuenta estos aspectos el trabajo que tiene como objetivo: desarrollar un sensor para la determinación continua de la compactación de los suelos agrícolas.

Fundamentación del sensor

A partir del análisis de la situación actual del diseño de los sensores de compactación se decide que el principio de funcionamiento del sensor a desarrollar se base en el sensoramiento de las tensiones del suelo, es decir según Hemmat y Adamchuk (2008), se clasificará como un sensor de fuerzas verticales y horizontales.

El sensor desarrollado se conformó por un órgano de trabajo del tipo escarificador alado, y un transductor octagonal de anillos extendidos (Figura 1), similar al desarrollado por Godwing (1975), ambos elementos fueron construidos en el taller de prototipos del CEMA.

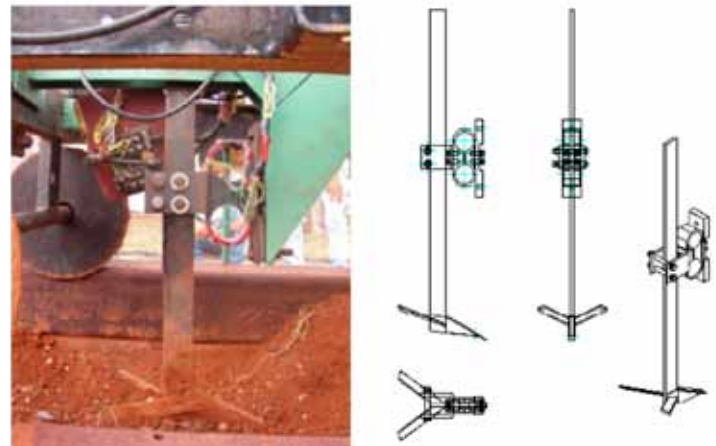


FIGURA 1. Sensor de compactación desarrollado en el CEMA.

Principio de funcionamiento del sensor. Al interactuar la reja y la parte frontal del brazo o soporte del sensor con el suelo, este último acciona el transductor octagonal deformándolo de forma tal que se puede determinar mediante la extensometría las fuerzas o resistencia que opone el suelo al ser cortado, tanto en el eje vertical como horizontal. Además el transductor podrá sensar el momento flector (M_{xz}) alrededor del eje xz . En este caso el soporte o brazo para la medición de las tensiones actúa como un brazo rígido (tine-based). A partir de la determinación de estos esfuerzos se puede sensar el estado físico del suelo al correlacionar la densidad volumétrica con la impedancia mecánica, mediante la ecuación obte-

nida experimentalmente por Mouazem (2003a), que involucra la profundidad de trabajo, estado de humedad del suelo y la fuerza de tiro horizontal.

Programa y metodología de las Investigaciones experimentales

Las investigaciones experimentales se realizaron en el canal de suelos CS-CEMA-25 del Centro Mecanización Agropecuaria (CEMA), de la Universidad Agraria de La Habana, durante los meses abril y mayo del año 2004. El mismo fue modificado y perfeccionado con el objetivo de garantizar los requisitos tecnológico y de explotación requeridos para este tipo de investigación. Las modificaciones realizadas y características técnicas del canal se detallan por Iglesias y Herrera (2003a,b).

Metodologías para la preparación y acondicionamiento del suelo contenido en el canal

La preparación y acondicionamiento del suelo contenido en el depósito del canal (Ferralítico Rojo Compactado), siguió una secuencia que garantizo el desmenuzamiento, humedecimiento y compactación del mismo. El desmenuzamiento del suelo se realizó con la ayuda de un cultivador alado tipo escardillo, acoplado al carro portaherramientas, el cual descompactó y mulló el suelo hasta la profundidad de 0,30 m. El humedecimiento del suelo se realizó con una regadera a la cual se le adicionó un contador de flujo para cuantificar la cantidad de agua suministrada en un intervalo de tiempo dado. Para garantizar la uniformidad de riego se subdivide el depósito de suelo en 8 partes iguales de 3 m cada una. La cantidad de agua a añadir en cada caso se determina según la ecuación 1.

$$aa = \frac{W_{opt} - W_{inic}}{100 + W_{inic}} \cdot cm \quad (1)$$

donde:

Aa—Cantidad de agua a añadir, mL;

W_{opt} —Humedad óptima (Humedad de experimentación), %;

W_{inic}^{opt} —Humedad inicial (higroscópica), %;

cm—Cantidad de suelo a humedecer, g.

Finalmente se tapa el depósito de suelo con una banda de nylon durante 24 h, para garantizar la homogenización de las condiciones de humedad del suelo.

En los ensayos que se requiere que el suelo esté compactado se acopla al carro porta herramientas un rodillo que posibilita la compactación del suelo de forma mecanizada.

Metodología para el sensoramiento de la resistencia o impedancia mecánica del suelo

Para el sensoramiento de la resistencia mecánica del suelo se recurrió al empleo de la extensometría, para lo cual se empleó el sensor fundamentado anteriormente, acoplado a un sistema para la adquisición y almacenamiento de datos conformado por un amplificador de señales KYOWA de seis

canales; tarjeta de conversión analógica digital; computadora personal Pentium IV con procesador a 1,5 GHz, 500 MB de memoria RAM y 40 HB de disco duro. La computadora controla el sistema mediante un software (Tensoft), que posibilita la adquisición, almacenamiento, visualización y graficación de los datos registrados.

La fuerza de resistencia que opone el suelo a ser cortado en el sentido del movimiento del sensor se determinó a partir de las lecturas de los voltajes de salida del transductor mediante la ecuación 2, obtenida durante la calibración del transductor.

$$D = \frac{Vs + 0,0002}{0,8213} \quad (2)$$

donde:

D—fuerza que opone el suelo a ser cortada en el sentido del movimiento del sensor, kN;

Vs—voltaje de salida del puente del transductor, mV.

Determinación experimental de la velocidad de avance de la herramienta de labranza

La determinación de la velocidad de desplazamiento de la herramienta de labranza se mediante el sensor de velocidad, el cual permite determinar de forma indirecta, el espacio recorrido y la velocidad de avance del carro porta herramientas.

Planificación de los experimentos

Partiendo de la necesidad de evaluar el funcionamiento del sensor en diferentes condiciones de suelo y velocidades de trabajo, se define como variables independientes: X_1 , velocidad de trabajo (V), km/h; X_2 , humedad del suelo (MC), %; X_3 , densidad volumétrica del suelo (BD), g/cm³;

Como variable dependiente, se define: Y_1 , fuerza que opone el suelo a ser cortado en el eje x (D), kN;

La experimentación se realizará a dos niveles de humedad y densidad, considerando dos estados fundamentales del suelo para cada variable (húmedo o seco; suelto o compacto). Los valores absolutos de dichas variables en cada condición dependerán del estado del suelo en el momento de la experimentación.

La profundidad de trabajo se mantendrá constante a 0,20 m, aunque las mediciones de la densidad y humedad del suelo se harán en dos horizontes de profundidad (0 a 0,10 m; 0,10 a 0,20 m).

Conociendo que los modelos toman en cuenta la velocidad de avance como una de sus variables independientes, los experimentos se desarrollan a dos niveles de velocidades de avance del órgano de trabajo, es decir un nivel alto y uno bajo.

Las corridas experimentales se repetirán tres veces, para lo cual se subdividieron los 25 m de longitud total del canal en tres parcelas de 7 m cada una, se dejaron dos parcelas en los extremos del canal de 2 m de longitud cada una, para garantizar la aceleración y desaceleración del carro portaherramientas.

Metodología para la determinación de las condiciones del suelo

Para la determinación del estado de compactación y humedad del suelo las parcelas de pruebas coincidentes con cada una de las replicas de la corridas experimentales se diseñaron de forma tal que se atenuaron los posibles efectos de borde, pues en la misma se desechan 50 cm a ambos lados de las fronteras con las parcelas contiguas, (Figura 2). Se procederá a la recolección de las muestras antes del paso del órgano de trabajo. El número de muestras en cada parcela (5), se determinó según el criterio de Student, las mismas se tomarán en la zona de acción directa del órgano de trabajo, a dos niveles de profundidad (10 y 20 cm), Figura 2.

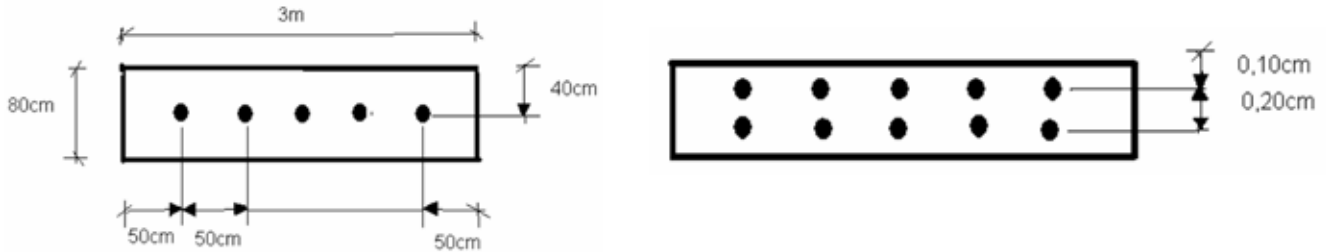


FIGURA 2. Esquema de las zonas de muestreo en el canal de suelos. Vista en planta y lateral.

Metodología para determinar la humedad del suelo

El método empleado fue el gravimétrico, con secado en la estufa a 60 °C de temperatura durante 24 horas, hasta alcanzar una masa constante NAR 6-372:80. El valor de la humedad se calculó mediante la siguiente expresión:

$$MC = \frac{P_1 - P_2}{P_2 - m} \cdot 100 \quad (3)$$

donde:

MC-humedad del suelo, %;

P1-masa del suelo húmedo dentro del recipiente, g;

P2-masa del suelo seco dentro del recipiente, g;

m-masa del recipiente sin muestra, g.

Metodología para la determinación de la densidad aparente

Para la determinación de la densidad aparente se recurre al método de los cilindros de Kopecki, procediéndose para su muestreo de igual forma que para la humedad en cuanto al número de observaciones y rango de profundidades muestreados.

La determinación en la fase de laboratorio se realizó según las normativas establecidas NAR 6-372:80. Finalmente la densidad se calculó, como:

$$BD = \frac{Gn}{Vc} \quad (4)$$

donde:

BD-Densidad aparente seca del suelo, g/cm³;

Gn-masa del suelo después de secada, g;

Vc-volumen del cilindro para la toma de muestras, cm³.

Metodología para la estimación de la compactación del suelo

La estimación de la compactación del suelo a partir de la medida la resistencia mecánica del suelo mediante el empleo de las formulaciones desarrolladas y corregidas por Mouazem *et al.*, (2003a); Mouazem *et al.*, (2003b); Mouazem *et al.*, (2009).

$$BD = \left(\frac{\sqrt[3]{D + 21,36 \cdot MC - 73,9313 \cdot d^2}}{1,6734} \right) \quad (5)$$

$$BD = \left(\frac{\sqrt[3]{D + 21,36 \cdot MC - 73,9313 \cdot d^2}}{1,6734} \cdot 1,14 \right) \quad (6)$$

$$BD = \left(\frac{\sqrt[3]{D + 21,36 \cdot MC - 73,9313 \cdot d^2}}{1,6734} \cdot 1,14 \right) \cdot (1,240 - 0,592 \cdot MC - 0,000792 \cdot clay) \quad (7)$$

$$BD = \left(\frac{\sqrt[3]{D + 21,36 \cdot MC - 73,9313 \cdot d^2}}{1,6734} \cdot 1,14 \right) \cdot (1,255 - 0,775 \cdot MC) \quad (8)$$

donde:

BD-densidad volumétrica seca del suelo, g·cm⁻³;

D-fuerza de tiro horizontal, kN; MC, contenido de humedad del suelo, kg·kg⁻¹;

d-profundidad de trabajo, m; clay, contenido de arcilla del suelo, %.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de las investigaciones experimentales realizadas en las condiciones controladas del canal de suelos para comprobar la funcionalidad del sensor desarrollado

Los resultados muestran (Tabla 1), que el contenido de humedad del suelo durante la experimentación alcanzó valores de 21 al 35%, o sea, se experimentó en condiciones de suelo seco y húmedo, ligeramente por encima del límite plástico. Los valores de la densidad aparente seca oscilaron entre un 0,89 y 1,0 g·cm⁻³, es decir no alcanzó altos niveles de compactación. La Velocidad de trabajo del sensor fue 1,67 y 5 km·h⁻¹, garantizando los niveles altos y bajos de lo velocidades requeridos para verificación de la funcionalidad del sensor

TABLA 1. Resultados de la estimación de la densidad aparente seca del suelo

Nivel Exp	Dmáx, kN	MC, kg/kg ⁻¹	d, m	Clay, %	BD, g·cm ⁻³	Ec 5	Er, %	Ec 6	Er, %	Ec 7	Er, %	Ec 8	Er, %	V, km/h
Bajo	0,76	0,21	0,2	45,0	0,89	0,79	10,5	0,90	0,51	0,85	4,16	0,86	3,13	5,00
Alto	0,42	0,35	0,2	45,0	1,00	1,02	1,80	1,16	16,1	1,02	1,50	1,00	0,23	1,67

El Análisis de la exactitud del sensor en la estimación de la compactación del suelo a partir del empleo de las formulaciones propuestas por Mouazem *et al.*, (2003a); Mouazem *et al.*, (2003b); Mouazem *et al.*, (2009), es decir ecuaciones 5 a 8, mostró que las mismas introducen un error en la predicción de la densidad aparente de los suelos ferralíticos rojos compactados que oscila entre de 0,15 a 16,06% (Tabla 1), en función del estado de humedad del suelo (MC) y el nivel de esfuerzo comprendido en la estimación (D). La mayor exactitud en las predicciones se alcanzó cuando el suelo se encuentra en estado suelto o poco compacto, como es el caso de las corridas 4 y 5. Este resultado puede estar dado por que en este estado, el suelo objeto de estudio desde el punto de vista mecánico

tiene un comportamiento más cercano a los suelos arenosos que a los suelos arcillosos (Herrera, 2006), lo cual está en correspondencia con los tipos de suelos en los cuales fueron desarrollados y validados originalmente estos modelos. En el caso específico de la velocidad no se aprecia influencia de esta variable en la estimación, resultado que está dado por su exclusión en las formulaciones empleadas para la estimación de la densidad aparente seca.

La comparación de las medias de la densidad predichas, con las medias de la densidad obtenidas experimentalmente mostró (Tabla 2), que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las misma, con un 95 % del nivel de confianza.

TABLA 2. Tabla de ANOVA

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	0,03457	4	0,0086425	0,63	0,6492
Within groups	0,20605	15	0,0137367		
Total (Corr.)	0,24062	19			

La aplicación de un test de rangos múltiples mostró que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los pares de medias al 95% del nivel de confianza. Finalmente se puede afirmar que la ecuación que predijo con mayor exactitud la densidad del suelo fue la ecuación 7, pues los errores de las predicciones oscilan entre 1,50 y 4,16%, la mínima diferencia significativa entre las medias predichas y observadas fue de 0,025.

Estos resultados corroboran la actitud del sensor desarrollado para la determinación continua de la compactación del suelo, quedando aun por investigar la validez de las ecuaciones de predicción en un rango más amplio de condiciones de suelos, sobre todo para suelos más compactos.

CONCLUSIONES

- Los resultados evidencian la aptitud del sensor para la medición continua de la compactación del suelo;
- Los errores en la estimación continua de la compactación del suelo oscilaron entre 1,50 y 4,16%;
- La exactitud de la predicción de la compactación de los suelos objeto de estudio dependerá de las condiciones físicas del suelo y la aptitud de las ecuaciones de predicción empleadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMCHUK, V. I.; A. SUDDUTH; J. INGRAM; S. CHUNG: *Comparison of Two Alternative Methods to Map Soil Mechanical Resistance On-the-Go*, 11pp. ASAE Paper: 061057, USA, 2006a.

ADAMCHUK, V.I.; W. HUMMEL; T. MORGAN; K. UPADHYAYA: "On-the-go soil sensors for precision agriculture", *Computers and Electronics in Agriculture*, 44: 71-91, 2004.

- ADAMCHUK, V.I.; E. LUND; A. DOBERMANN; T. MORGAN: *On-the-go mapping of soil properties using ion-selective electrodes*, pp. 27–33, In: Stafford, J., Werner, A. (Eds.), Precision Agriculture. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands, 2003a.
- ADAMCHUK, V.I.; T. MORGAN; 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., V. SKOTNIKOV; D. SPEICHLINGER; F. KOCHER: *Instrumentation system for variable depth tillage*, ASAE Paper No. 03-1078, USA, 2003b.
- ANDRADE SÁNCHEZ, P.; K. UPADHYAYA; M. JENKINS; C. PLOUFFE; B. POUTRE: *Field evaluation of the improved version of the UC Davis compaction profile sensor (UCD-CPS)*, 12pp., ASAE Paper: 041037, USA, 2004.
- ANDRADE SÁNCHEZ, P.; K. UPADHYAYA; K. SAKAI: *Variability in Draft Data Observed During Tillage*, 10pp., ASAE Paper: 031121, USA, 2003.
- CHUNG, S.; A. SUDDUTH; W. HUMMEL: *On-the-go soil strength profile sensor using a load cell array*, 9pp., ASAE Paper No. 03-1071, USA, 2003.
- CHUNG, S.O.; A. SUDDUTH KENNETH; C. PLOUFFE: *Evaluation of an On-the-go Soil Strength Profile Sensor Using Soil Bin and Field Data*, 23pp., ASAE Paper: 041039, USA, 2004.
- GLANCEY, J.L., K. UPADHYAYA; J. CHANCELLOR; W. RUMSEY: “An instrumented chisel for the study of soil-tillage dynamics”, *Soil and Tillage Research*, 14: 1–24, 1989.
- GODWIN, R. J.: “An extended octagonal ring transducer for use in tillage studies”, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 20: 347–352, 1975.
- GORUCU, S.; A. KHALILIAN; J. HAN; R. DODD; F. WOLAK; M. KESKIN: Variable depth tillage based on georeferenced soil compaction data in Coastal Plain region of South Carolina, 15pp., ASAE Paper: 01-1016, USA, 2001.
- HALL, H. E.; L. RAPER: “Development and concept evaluation of an on-the-go soil strength measurement system”, *Transactions of the ASAE*, 48(2): 469–477, 2005.
- HELLE, O.; R. VON KONTA: *Agricultura de Precisión: Introducción al manejo sitio-específico*, pp. 107-114, Cargill, México, 2006.
- HEMMAT, A.; I. ADAMCHUK: “Sensor systems for easuring soil compaction: Review and análisis”, *Computers and Electronics in Agriculture*, 6(3): 89–103, 2008.
- HERRERA SUÁREZ, M.; IGLESIAS CORONEL, C.E.; LÓPEZ BRAVO, E.; GONZÁLEZ CUETO, O. Y SÁNCHEZ IZNAGA, A.L.: Sensoramiento continuo de la compactación del suelo, En: **III Conferencia Científica de La Habana Agring ‘2009**, La Habana, Cuba, 2009.
- IGLESIAS CORONEL, C. E.; M. HERRERA: Fundamentación de un canal de suelos para los estudios de labranza, trafabilidad y compactación, En: **Memorias de la Segunda Conferencia Sobre Desarrollo y Sostenibilidad, Agrocentro 2003**, Universidad Central de Las Villas, 17-19 de junio de 2003, ISBN 959-250-078-9, Santa Clara, Cuba, 2003a.
- IGLESIAS CORONEL, C. E.; M. HERRERA: Diseño y perfeccionamiento de un canal de suelos para la investigación de órganos de trabajo de máquinas agrícolas, En: **Memorias de la 8va. Convención y Feria de las Industrias Metalúrgica, Mecánica y del Reciclaje. Metánica 2003**, Palacio de Las Convenciones, 14-18 de julio de 2003, ISSN-1607-6281, La Habana, Cuba, 2003b.
- KALEITA, A. L.; L. TIAN: *Remote Sensing Of Site-Specific Soil Characteristics for Precision Farming*, 11pp., ASAE Paper: 021078, 2002.
- MANOR, G.; L. CLARK: *Development of An Instrumented Subsoiler to Map Soil Hard-Pans and Real-Time Control of Subsoiler Depth*, ASAE Paper No. 01-1022, 2001.
- MARTÍNEZ RODRÍGUEZ, A.; A. MOREJÓN: Propuesta de Método e Instrumento para el Registro Continuo del Perfil de Compactación del Suelo, En: **II Conferencia Científica de La Habana Agring ‘2006**, La Habana, Cuba, 2006.
- MOUAZEN, A.M.; H. RAMON; J. DE BAERDEMAEKER: “Modeling compaction from online measurement of soil properties and sensor draught”, *Precision Agriculture Journal*, 4(2): 203–212, 2003a.
- MOUAZEN, A.M.; K. DUMONT; K. MAERTENS; 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.; H. RAMON: “Development of on-line measurement system of dry bulk density based on on-line measured draught, depth and soil moisture content”, *Soil & Tillage Research*, 86(2): 218–229, 2006.
- MOUAZEN, A.M.; 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.T.; H. DRUMMOND; L. COBB; J. GODWIN: “An instrumentation system for deep tillage research”, *Transactions of the ASAE*, 30(6): 1578–1582, 1987.
- RAPER, R.L.; E.H. HALL: *Soil strength measurement for site-specific agriculture*, US Patent No. 6647799, US Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 2003.
- STAFFORD, J.V.; J.G. HENDRICK: “Dynamic sensing of soil pans”, *Transactions of the ASAE*, 31(1): 9–13, 1988.
- TEKESTE, M.Z.; T.E.GRIFT; R.L. RAPER: *Acoustic Compaction Layer Detection*, 8pp., ASAE Paper: 021089, USA, 2002.
- VAN BERGEIJK, J.; D. GOENSE: Soil tillage resistance as tool to map soil type differences. In: Robert, P.C., Rust, R.H., Larson, W.E. (Eds.), **Proceedings of the Third International Conference on Precision Agriculture, ASA-CSSA-SSSA**, pp. 605–616, Madison, Wisconsin, USA, 1996.
- VERSCHOORE, R.; J.G. PIETERS; T. SEPS; Y. SPRIET; J. VANGHEYTE: *Development of a sensor for continuous soil resistance measurement*, pp. 689–695, In: Stafford, J.; A. Werner, (Eds.) Precision Agriculture, Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands, 2003.