

Sensor para medición de la compactación del suelo

Masch, Federico², Flores, Gustavo¹, Ramirez, Pablo¹, Hecker, Rogelio^{1,2}

¹Facultad de Ingeniería, UNLPam. Calle 110 esq. 9, General Pico, La Pampa, Argentina.

gmflores@ing.unlpam.edu.ar

pablolrg@yahoo.com.ar

²CONICET, Argentina.

maschfederico@gmail.com

hecker@ing.unlpam.edu.ar

Resumen. La compactación de los suelos agrícolas forma parte de los principales factores de degradación de los mismos e incide negativamente en el rendimiento de los cultivos. A la hora de elaborar estrategias de manejo de suelos, determinar el grado de compactación del mismo tanto como su variabilidad espacial en una zona determinada, forma parte de los datos de entrada de la toma de decisiones bajo el paradigma de la Agricultura de Precisión sobre y para un modelo de explotación agrícola eficiente y sustentable.

En este trabajo se presenta el diseño de un dispositivo que permitirá estimar la compactación del suelo. El mismo consiste en una cuchilla plana que posibilita medir la resistencia mecánica a distintas profundidades, cuando esta se desplaza dentro del mismo. Se utilizan herramientas de cálculo y simulación por elemento finito y conceptos de diseño *flexure stage* para la obtención de un diseño robusto y simplicidad constructiva.

Palabras claves: Agricultura de Precisión, compactación de suelos, flexure stage, strain gauge, sensor, on-the-go.

1 Introducción

La definición formal de compactación está dada por SSSA (1996) como el proceso físico por el cual los granos del suelo se acomodan de manera tal que se reduce la porosidad y aumenta la densidad aparente del mismo [1]. Este fenómeno afecta el desarrollo radicular de las plantas, disminuye el intercambio gaseoso y la capacidad de infiltración de agua en el suelo [2-4]. Por lo tanto este es uno de los tantos fenómenos físicos responsables de la degradación de la calidad de los suelos destinados a la producción de alimentos [5-6], el cual está tomando especial relevancia en concordancia con la implementación del método de siembra directa en Argentina [7].

La manera habitual de determinar el grado de compactación de un suelo, es mediante la medición directa de la densidad aparente y la porosidad del mismo [8]. Sin embargo, estos métodos de medición consumen mucho tiempo y demandan condiciones de laboratorio para llevarlas a cabo. Por lo tanto, se recurren a métodos de medición indirecta realizadas en el mismo lugar. Uno de estos métodos al cual se

puede mencionarse es el denominado método del cono (penetrómetro), en el cual se determina la fuerza necesaria para hacer penetrar un elemento cónico conocido y establece la práctica estándar para determinar el grado y la variabilidad de la compactación del suelo en función de su resistencia mecánica [9].

A la hora de elaborar estrategias de manejo de suelos bajo el paradigma de Agricultura de Precisión, el estado de compactación toma un papel relevante. La utilización del método del cono, como método de medición del grado y variabilidad de la compactación, exige un alto costo para obtener la densidad de muestreo adecuada. Esta situación, impulsa el desarrollo de sensores sobre-la-marcha (on-the-go) para determinar, no solo el grado de compactación de los suelos, sino también las distintas propiedades físicas y químicas del mismo de forma continua, georreferenciada y en tiempo real. Estos sensores permiten obtener mediciones con una alta densidad de muestreo y gran utilidad para el posterior manejo, garantizando su mejoramiento puntual y localizado del suelo [10].

Numerosos investigadores y fabricantes han desarrollado sensores sobre-la-marcha destinados a medir las propiedades del suelo mediante interacciones físicas con él mismo. Estos se pueden agrupar según su modo de interacción en: eléctricos y electromagnéticos, ópticos y radiométricos, mecánicos, acústicos, neumáticos y electroquímicos [11]. En lo que concierne sobre la determinación del grado de compactación, la atención se ha centrado en el desarrollo principalmente de sensores mecánicos los cuales surgen como inducción natural del método del penetrómetro. Dichos sensores son diseñados bajo la premisa de que la resistencia mecánica, la cual el suelo ofrece al movimiento de una cuchilla plana dentro de su seno, es un método indirecto que permite la determinación del grado de compactación. El desarrollo de modelos físicos sobre la interacción suelo-herramienta por diversos autores [12-14], destinados a estimar los esfuerzos de labranza de cuchillas planas, subsoladores, etc., establecen el marco adecuado para el desarrollo de sensores mecánicos, ya que estos modelos establecen relaciones entre las variables tales como la fuerza de interacción, propiedades de suelo (densidad aparente, cohesión, ángulo de fricción interna, etc.), variables geométricas y cinemáticas de la interacción suelo-herramienta. Además el desenvolvimiento de estos sensores generalmente es contrastado con las lecturas obtenidas por el método del cono [15] o también contrastado con lecturas de la densidad aparente en seco del suelo [16].

2 Descripción de modelos previos de cuchillas

Es posible clasificar los sensores mecánicos, en función del concepto de desarrollo adoptado. Los primeros sensores desarrollados estuvieron destinados a medir la resistencia mecánica total del suelo y a la visualización de la dinámica de fractura de la interacción suelo-herramienta. Sus diseños consisten en la utilización de una celda única de carga para la medición de resistencia mecánica total, dando solo la capacidad de determinar la variabilidad horizontal de la resistencia mecánica total [17-20].

Otros investigadores, plantearon conceptos de desarrollo diferentes ante la necesidad de detectar la variabilidad vertical de la resistencia mecánica resultante de la in-

teracción suelo-herramienta. Uno de estos conceptos consiste en una cuchilla plana, a la cual se le instala un conjunto de galgas extensiométricas distribuidas en su geometría tal como se puede observar en la Figura 1. En función de las deformaciones localizadas medidas por estas galgas se estima el perfil de presión en el frente de ataque de la cuchilla generado en la interacción suelo-herramienta. [21-23]. Este concepto de sensor mecánico demanda la adopción de un modelo matemático para estimar el perfil de presión en el frente de la cuchilla en función de las mediciones de las deformaciones localizadas obtenidas a través de las galgas extensiométrica. Es posible observar un acoplamiento entre las lecturas de las distintas galgas extensiométricas debido a su disposición en la cuchilla, la geometría de la misma y las fuerzas de interacción a las que se encuentra sometida. Esta situación impide la utilización individual de cada lectura de las galgas para estimar la fuerza de interacción suelo-herramienta a una determinada profundidad. El modelo matemático adoptado fija la forma de datos de salida del sensor, por ejemplo: para una estimación lineal del perfil presión el sensor provee dos datos, ordenada al origen y pendiente. La capacidad de resolución vertical del sensor se encuentra limitada por el grado de la función utilizada para estimar el perfil de presión.

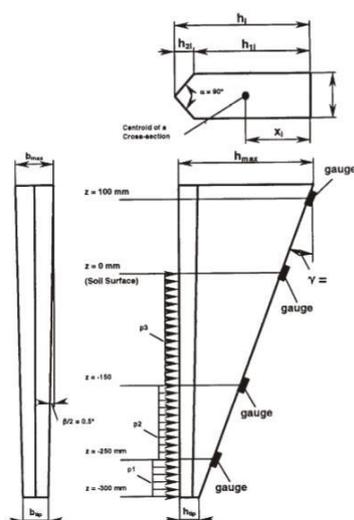


Fig. 1. Esquema ilustrativo de cuchilla plana desarrollada por Adamchuk, V.I. Se pueden observar la distribución geométrica de galgas extensiométricas para estimar el perfil de presión en el frente de cuchilla. (Fuente: Adamchuk, V.I. (2001). Application of a strain gauge array to estimate soil mechanic impedance on-the-go, pp 278)

Un segundo concepto de desarrollo, avanza en la necesidad de determinar también la variabilidad vertical de resistencia mecánica, mediante la adopción de métodos de medición directa en el frente de ataque de la cuchilla [24-27]. El método de medición directa, posee la característica de poder obtener un conjunto de lecturas de resistencia mecánica a distintas profundidades de suelo tal como se puede observar en las

Figura 2 y Figura 3. Estas mediciones, se realizan a través de celdas de carga debidamente instaladas sobre cuchilla. El sensor provee n-datos de salida, los cuales son lecturas de resistencia mecánica del suelo de n-intervalos de profundidad de suelo. La capacidad de resolución vertical depende directamente del cociente de la cantidad de zonas de medición del sensor, profundidad total a medir. Estos sensores, cabe mencionar, en contraposición a los ya citados anteriormente, poseen en general una mayor complejidad constructiva y conjunto de piezas mayor, lo cual deriva en un diseño menos robusto que los ya citados.

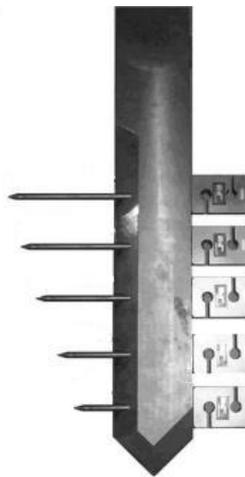


Fig. 2. Fotografía de cuchilla de múltiples sensores horizontales. (Fuente: Sharifi, A. (2012). Soil mechanical resistance measurement by an unique multi-cone tips horizontal sensor, pp 62).



Fig. 3. Esquema de cuchilla desarrollada por la Universidad de California-Davis. (Fuente: Sudduth, K.A. (2008). Field comparison of two prototype soil strength profile sensors, pp 23.)

En el contexto donde los sensores mecánicos se desenvuelven, existen factores propios al suelo (humedad, fricción, piedras, vegetales, rastrojos, raíces), factores climáticos (precipitaciones, temperatura, viento), factores de implementación (maquinarias de tracción, implementos y métodos de clavado) y factores de humanos (concentración, metodologías de trabajo, etc.) que exigen un diseño con un grado de robustez adecuado a dicho contexto. Esta necesidad se suma a la ya mencionada necesidad de determinar la variabilidad horizontal y vertical de la resistencia mecánica del suelo. Por lo tanto, el sensor mecánico debe reunir las cualidades de: poseer un método constructivo simple el cual minimice la cantidad de piezas mecánicas. El grado de robustez necesario para que el mismo se desarrolle de forma óptima en condiciones de campo y la capacidad de realizar mediciones directas de la resistencia mecánica del suelo en la interacción suelo-herramienta generada en el frente de la cuchilla.

En la presente publicación, se presenta el diseño de un sensor mecánico, el cual consiste en una cuchilla construida en una sola pieza y bajo el concepto de *flexure stage* el cual permite la creación de zonas medición destinadas a determinar la resistencia mecánica del suelo a diversos rangos de profundidad.

3 Propuesta de nueva cuchilla

Al igual que en trabajos previos se propone medir la resistencia mecánica al avance a partir de la deformación de zonas particulares de la cuchilla. Con el objeto de localizar las zonas de máximas deformaciones se adopta la generación de orificios circulares en el frente de la cuchilla. Se selecciona esta geometría, sencilla y fácil de practicar, dado que es bien conocido el comportamiento de anillos circulares sometidos a esfuerzos [28]. Es importante destacar, para el presente diseño de cuchilla, que ante una fuerza radial el anillo circular presenta dos zonas de máxima deformación ubicadas a $\pm 90^\circ$ de la dirección de aplicación. Puesto que la implementación de anillos circulares, en el plano de la cuchilla, implicaría dificultades constructivas se propone una variante que se podría denominar anillo rectangular, Figura 4 (a). En este caso la geometría estaría dada por un rectángulo con un círculo en su interior. Claramente esta geometría sería fácil de practicar en el frente de la cuchilla mediante la creación de ranuras por encima y por debajo del orificio, Figura 4 (b). Puesto que esta configuración produce una disminución de la rigidez en la dirección perpendicular al plano del anillo, se propone que la ranura no sea completa y adopte la forma de la Figura 4 (c). Esta configuración de la ranura forma un vínculo tipo viga, de longitud $L1$ y espesor $t1$, entre el anillo y el cuerpo de la cuchilla. Una alta relación entre $L1$ y $t1$ disminuye la interferencia de este vínculo con la medición de la fuerza captada por el anillo rectangular, aumentando su rigidez transversal.

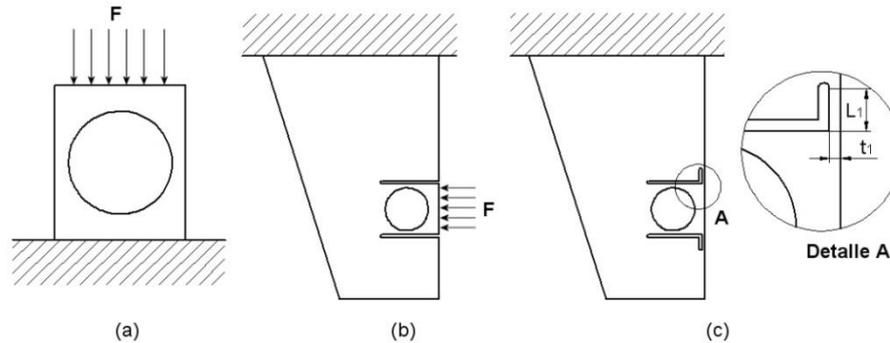


Fig. 4. Diseño cuchilla: (a) Anillo rectangular, (b) Implementación de anillo rectangular en la cuchilla, (c) Aumento de la rigidez transversal del anillo.

Dado que el presente trabajo intenta estimar el perfil de compactación del suelo, es necesario medir la resistencia al avance a distintas profundidades. Esto implica implementar tantos anillos rectangulares como puntos de medición se quieran realizar. Ahora bien, como la cuchilla se comporta como una viga en voladizo es de esperar que se genere una distribución de tensiones que producirán deformaciones sobre los anillos ubicados por encima de las fuerzas aplicadas. Esto claramente inducirá lecturas erróneas de deformación. Por lo tanto es necesario lograr un desacople en la lectura de los anillos de manera de independizar las lecturas en cada anillo. Esto se logra practicando ranuras sobre el frente de la cuchilla como muestra la Figura 5. Esta configuración de ranuras genera un nuevo vínculo tipo viga de longitud L_2 y espesor t_2 entre el anillo y la cuchilla. Este vínculo disminuye en parte la propagación del esfuerzo de tracción generado en el frente de la cuchilla, producto de una fuerza aplicada en su extremo, logrando el desacople buscado en la medición de deformación captada por cada anillo.

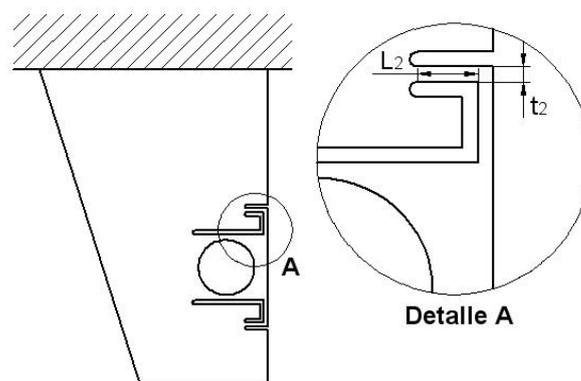


Fig. 5. Detalle de la implementación del anillo rectangular en la cuchilla.

Teniendo en cuenta lo planteado se presenta en la Figura 6 el modelo tridimensional de una cuchilla para medir la resistencia al avance en tres profundidades distintas. Es de destacar que para facilitar los estudios realizados se utilizó un modelo simplificado de la cuchilla que no cuenta con un ángulo en el borde de ataque para romper el suelo.

Con el objeto de estudiar el comportamiento de la cuchilla se efectuaron simulaciones utilizando el método de elementos finitos. A continuación se presentan los principales resultados obtenidos por simulación.



Fig. 6. Modelo tridimensional de la cuchilla para medir la resistencia al avance a distintas profundidades.

4 Resultados de simulación

Para verificar el desacople en la medición de los anillos se efectuaron simulaciones aplicando las restricciones de empotramiento y un perfil de presión constante en el anillo inferior, siendo esta la situación más desfavorable, Figura 7. Al analizar las deformaciones de los anillos se observó una importante deformación en el anillo inferior, producto de la fuerza aplicada, siendo baja en los anillos superiores indicando que se logró un buen grado de desacople entre los mismos.

Como la resistencia al avance en cada tramo de la cuchilla se obtiene a partir de las deformaciones captadas en cada anillo, es necesario determinar la constante de proporcionalidad entre ambas magnitudes. Para obtener estas constantes se aplicó un perfil de presiones en cada tramo y se midieron las deformaciones en cada anillo. En la Tabla 1 se presenta las constantes obtenidas siendo k_1 , k_2 y k_3 las correspondientes al tramo inferior, medio y superior respectivamente.

También se analizó el comportamiento de la cuchilla ante condiciones similares a las que se encontraría sometida en campo. Para tal estudio, se aplicaron diferentes

perfiles de presión, sin tener en cuenta las fuerzas de rozamiento sobre la superficie de la cuchilla, con el objeto de determinar el error de medición. De acuerdo a los diferentes tipos de perfiles que se encuentran en los suelos se aplicaron perfiles de presión lineal, cuadrática y uno polinómico de grado 4. La Figura 8, muestra los diferentes perfiles aplicados, la imagen de la izquierda muestran los vectores de fuerza para el perfiles polinómico.

Realizadas las simulaciones para cada uno de los perfiles de presión se obtuvieron los valores de deformación en cada uno de los anillos. Luego multiplicando estos valores por las constantes correspondientes se obtienen las presiones medias, medidas sobre cada tramo de la cuchilla o sobre cada anillo. Se calcularon las presiones medias teóricas aplicadas para cada perfil y se compararon con las presiones medias calculadas mediante las simulaciones obteniéndose los errores correspondientes para cada perfil, Tabla 2. Es importante destacar que en ninguno de los casos simulados las tensiones generadas superaron el límite elástico del material.

| Constante | Presión/deformación |
|-----------|---------------------|
| k1 | 11320,76 |
| k2 | 11363,64 |
| k3 | 8064,52 |

Table 1. Constantes de relación entre presión aplicada y deformación producida en cada tramo de la cuchilla.

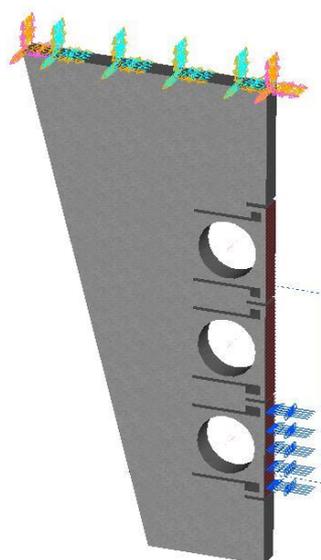


Fig. 7. Condición de contorno sobre la cuchilla para el caso de una presión constante.

Realizadas las simulaciones para cada uno de los perfiles de presión se obtuvieron los valores de deformación en cada uno de los anillos. Luego multiplicando estos valores por las constantes correspondientes se obtienen las presiones medias, medidas sobre cada tramo de la cuchilla o sobre cada anillo. Se calcularon las presiones medias teóricas aplicadas para cada perfil y se compararon con las presiones medias calculadas mediante las simulaciones obteniéndose los errores correspondientes para cada perfil, Tabla 2. Es importante destacar que en ninguno de los casos simulados las tensiones generadas superaron el límite elástico del material.

| Profundidad | Lineal | Cuadrático | Polinómico |
|----------------|--------|------------|------------|
| 0mm – 100mm | -2,85% | -7,71% | -4,83% |
| 103mm – 203mm | -1,33% | -2,06% | -2,68% |
| 206mm – 306 mm | -1,32% | 1,14% | 5,54% |

Table 2. Errores entre la presión medida y la aplicada para cada perfil de fuerzas.

La Figura 9 muestra el perfil cuadrático de presión aplicada y los valores medios de presión que se obtienen sobre cada tramo de la cuchilla. En la sección superior de la cuchilla, que va desde el nivel del suelo hasta los 100mm se encuentra el mayor error, debido al acoplamiento existente con las presiones sobre los tramos inferiores.

Los resultados de las simulaciones muestran que se obtuvo el diseño de una cuchilla de geometría sencilla, compacta y que permite distinguir valores de presiones a distintas profundidades con un buen grado de aproximación. En trabajos futuros se buscará determinar las dimensiones más apropiadas para los anillos y sus vínculos con la cuchilla, que mejoren la sensibilidad y el desacople en la medición.

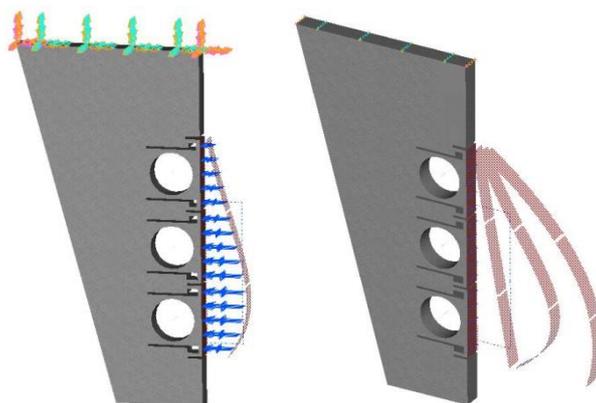


Fig. 8. Perfiles de presión aplicados sobre la cuchilla

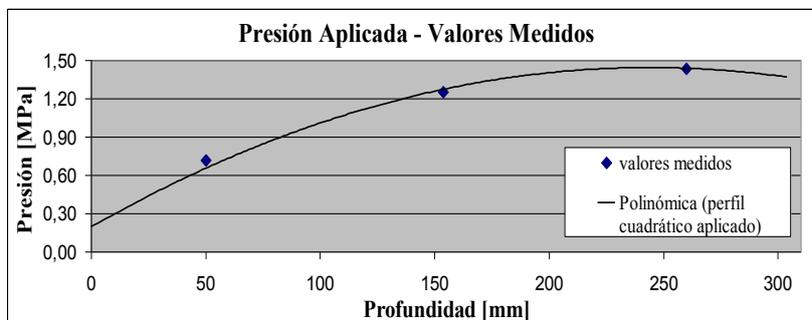


Fig. 9. Perfil cuadrático de presión aplicada y valores de presión obtenidos a distintas profundidades.

5 Conclusiones

En este trabajo se presentó el diseño de un dispositivo que permitirá estimar la resistencia mecánica de la interacción del suelo con una herramienta en forma de cuchilla vertical, que se desplaza dentro del terreno accionada por una máquina de labranza. Este dispositivo mide la resistencia al avance a partir de la deformación captada en orificios circulares practicados en el frente de la cuchilla. El diseño de ranuras convenientemente realizadas permite localizar las zonas de deformación e independizar la medición en distintas alturas de la cuchilla. La cuchilla se diseñó utilizando herramientas de cálculo y simulación por elementos finitos con la cual se hallaron las constantes de proporcionalidad entre la deformación y la presión aplicada. Posteriormente se simularon condiciones de trabajo similares a las que se encontraría en campo, mediante la aplicación de perfiles de presión sobre el frente de la cuchilla, y se determinaron los errores de medición. Los resultados permiten afirmar que se obtuvo una cuchilla que permite distinguir valores de presiones a distintas profundidades con un buen grado de aproximación. El diseño se caracteriza por ser sencillo, compacto y sin elementos móviles.

Bibliografía

1. Doran, J.W., Parkin, T.B.: Quantitative indicators of soil quality: A minimum data set. *Methods for Assessing Soil Quality*. 22-27 (1996).
2. Gill, W.E., Vanden Berg, G.E.: Soil dynamics in tillage and traction. *Journal of Terramechanics*, 5(4), 65-66. (1967).
3. Romito, A., Paredes, D., Roba, M., Tesouro, J.: Evaluación de un accesorio descompactador para sembradoras de grano grueso. Instituto de Ingeniería Rural-CIA-CNIA-INTA Castelar. Informe técnico N°7. Ediciones INTA. (2008).
4. Pozzolo, O., Hidalgo, R., Santajuliana, H., Dominguez, F., Botta, G., Curro, C.: Cosecha de soja. Efectos sobre la compactación del suelo. XX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos y Ingeniería Geotécnica. (2010)

5. Carta Mundial de los Suelos FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nation. (1982) . <http://www.fao.org>.
6. Soluciones para la compactación de los suelos. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org>.
7. Draghi, L.I., Palancar, T.C., Soracco, G., Lozano, L., Jorajuria, D.: Siembra Directa y sustentabilidad. Impacto físico-mecánico sobre el suelo. UNLP, FCAF, Centro de Investigaciones en sustentabilidad de suelos agrícolas y Forestales. La Plata, Argentina., <http://www.fich.unl.edu.ar>
8. Johnson, C.E., Bailey, A.C.: Soil Compaction. Advances in Soil Dynamics. American Society of Agricultural and Biological Engineers. (2), 155-178.(2002).
9. ASAE S313.3. FEB04. American Society of Agricultural and Biological Engineers. (2004). <http://www.asabe.org/>
10. Naiqian , Z., Maohua, W., Ning, W.: Precision agriculture. A worldwide overview. Computers and Electronics in Agriculture, 36(2-3), 113-132.(2002)
11. Adamchuk, V.I., Hummel, J.W., Morgan, M.T., Upadhyaya, S.K.: On-the-go soil sensors for precision agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 44, 71-91. (2004).
12. Godwin, R.J., Spoor, G.: Soil failure with narrow tines. J. Agric. Eng. Res. 22(4), 213-228. (1977).
13. Mckyes, E.: Soil Cutting and Tillage. Developments in Agricultural Engineering, 7, Elsevier, Amsterdam.(1985).
14. Grisso, R.D., Perumpral, J.V., 1985. Review of models for predicting the performance of narrow tillage tools. Trans. Am. Soc. Agric. Eng. (ASAE). 28(4), 1062-1067. (1985).
15. Adamchuk, V.I., Skotnikov, A.V., Speichinger, J.D., Kocher, M.F.: Development of an Instrumented Deep-Tillage Implement for Sensing of Soil Mechanical Resistance. Biological Systems Engineering, 47(6), 1913-1919.(2004).
16. Mouazen, A.M., Dumont, K., Maertens, K., Ramon, H.: 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, 91-102. (2003).
17. Godwin, R.J.: An extended octagonal ring transducer for use in tillage studies. Journal of Agricultural Engineering Research, 20(4), 347-352. (1975)
18. Glancey, J.L., Chancellor, W.J., Upadahyaya, S.K., Rumsey, J.W.: An instrumented chisel for the study of soil-tillage dynamics. Soil & Tillage Research, 14(1), 1-24. (1989)
19. Mouazen, A.M., Ramon, H.: Development of on-line measurement system of bulk density based on on-line measured draught, depth and soil moisture content. Soil and Tillage Research, 86(2), 218-229. (2006)
20. Herrera, M.S., Coronel, C.I., Coba, D.L, Cueto, O.G., Bravo, E.L.: Development of a Sensor for Soil Continuous Compaction Measurement. 20(1). (2011)
21. Adamchuk, V.I, Morgan, M.T., & Sumali, H.: Application of a strain gauge array to estimate soil mechanic impedance on-the-go. Transactions of the ASABE, 44(6), 1377-1383. (2001).
22. Adamchuk, V.I, Ingram, T.J., Sudduth, K.A., Chung, S.O.: On-the-go Mapping of soil mechanical resistance using a linear depth effect model. 51(6), 1885-1894.(2008).
23. Adamchuk, V.I., Christenson, P.T.: Development of an instrumented blade system for mapping soil mechanical resistance represented as a second-order polynomial. Soil & Tillage Research, 95(1-2), 76-83. (2007)
24. Chung, S.O., Sudduth, K.A., Hummel, J.W.: Design and validation of an on-the-go soil strength profile sensor. American Society of Agricultural and Biological Engineers , 49(1), 5-14. (2006).

25. Gilandeh, Y.A.: On-the-go soil mechanical strength measurement at different soil depths. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 7, 696-699. (2009).
26. Sudduth, K.A., Chung, S.O., Sanchez, P., Upadhyaya, S.K.: Field comparison of two prototype soil strength profile sensors. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61(1), 20-31. (2008).
27. Sharifi, A., Mohsenimanesh, A.: Soil mechanical resistance measurement by an unique multi-cone tips horizontal sensor. Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences. *International Agrophysics* (26), 61-64. (2012).
28. Karabay, Sedat.: Design criteria for electro-mechanical transducers and arrangement for measurement of strains due to metal cutting forces acting on dynamometers. *Materials & Design* (28) 2, 496-506. (2007)