

## MODELOS NUMÉRICOS PARA LA SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA DEL SUELO AL TRÁFICO Y OPERACIONES DE LABRANZA

**ENTIDAD EJECUTORA PRINCIPAL:** <sup>1</sup>Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA), Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV).

**AUTOR PRINCIPAL:** Omar González Cueto

**OTROS AUTORES:** Elvis López Bravo<sup>1</sup>, Miguel Herrera Suárez<sup>4</sup>, Ciro E. Iglesias Coronel<sup>2</sup>, Carlos Alexander Recarey Morfa<sup>2</sup>, Roberto Amado Albóniga Gil<sup>2</sup>, Maykel Cruz Díaz<sup>1</sup>

**COLABORADORES:** Herman Ramon<sup>5</sup> y EngelbertTijskens<sup>5</sup>

### OTRAS ENTIDADES PARTICIPANTES

<sup>2</sup> Centro de Mecanización Agropecuaria, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad Agraria de la Habana, Cuba.

<sup>3</sup> Centro de Estudios de Métodos Numéricos en la Ingeniería, Facultad de Construcciones, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.

<sup>4</sup> Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Técnica de Manabí, Ecuador

<sup>5</sup> Universidad de Lovaina, Bélgica

### AUTOR PARA LA CORRESPONDENCIA

Dr. C. Omar González Cueto, Profesor Titular.

Departamento de Ingeniería Agrícola, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas,

Carretera a Camajuaní km 5 ½, Santa Clara, 54830, Cuba.

Tel: 42222875, Fax: 42281608,

e-mail: [omar@uclv.edu.cu](mailto:omar@uclv.edu.cu)

### RESUMEN

La compactación es un problema de alcance global y una de las principales causas de degradación antropogénica del suelo agrícola. El 23,9% del área agrícola de Cuba tiene problemas de drenaje o compactación natural. En Cuba, tanto la investigación de la compactación del suelo, como el diseño de medios para la labranza se han realizado mediante métodos empíricos, demandando gran cantidad de recursos materiales y humanos. La expansión de las capacidades computacionales y la necesidad de desarrollar soluciones a corto plazo han propiciado el desarrollo de la modelación y simulación en el área agrícola. Con la presente investigación se introduce, en Cuba, el empleo de la modelación mediante métodos numéricos a problemas del suelo agrícola. En el presente trabajo se han desarrollado dos modelos, uno de la compactación, mediante el Método de Elementos Finitos, que permite predecir el efecto sobre el suelo del tráfico de vehículos agrícolas sobre ruedas e investigar los factores que provocan compactación del suelo. El modelo permite conocer cuáles son las presiones que ejerce el vehículo, hasta qué profundidad se producirán estas presiones, cómo influyen los parámetros geométricos y de operación de los neumáticos, cuándo se provoca compactación del suelo. Para desarrollar el

modelo fue necesario investigar las propiedades físicas y mecánicas del suelo Ferralítico rojo compactado, uno de los más importantes de Cuba, desde el punto de vista económico. Se obtuvo el comportamiento de estas propiedades en función de la humedad y compactación (densidad de volumen), en condiciones desde suelo suelto hasta compacto y desde húmedo hasta seco. También se logró la validación de los modelos constitutivos de Drucker-Prager Extendido y Drucker-Prager Modificado, demostrándose que pueden ser empleados para representar la respuesta mecánica de este tipo de suelo, mediante el Método de Elementos Finitos, pudiéndose utilizar para modelar la compactación y otros fenómenos que ocurren en el suelo. El segundo es un modelo, desarrollado mediante el Método de Elementos Discretos, que permite simular el desempeño de aperos o implementos de corte del suelo y predecir los esfuerzos resultantes en la herramienta durante la labranza del suelo. Por consiguiente se obtiene el consumo de energía que provoca cada geometría del implemento investigado, así como, predice la respuesta mecánica del suelo durante el corte. Con la utilización de este modelo disminuyen las pruebas de campo, la construcción y modificación de prototipos así como un importante grupo de complejas instalaciones extensométricas necesarias para determinar los esfuerzos resultado del proceso de labranza. La divulgación se ha logrado con la publicación de 18 artículos científicos, de estos cuatro en revistas de la Web of Science o Grupo 1 y 14 en revistas del Grupo 2. Se han presentado los resultados en 14 Congresos Internacionales de ellos cuatro en México y 12 en Cuba. Este trabajo es respaldado por 24 avales de universidades e institutos de investigación en Cuba y el extranjero, avales de todas las universidades cubanas que forman profesionales en Ingeniería Agrícola y que han introducido estos modelos en la academia y la investigación, así como de dos entidades de Villa Clara que han hecho uso de los modelos para resolver problemas de sus instituciones. Esta investigación ha recibido tres Premios Provinciales ACC y es el resultado de tres tesis de doctorado defendidas en el Tribunal de Ciencias Técnicas Agropecuarias.

## **COMUNICACIÓN CORTA**

### **Introducción**

Las fuerzas requeridas durante las operaciones de labranza y las presiones que ejercen los neumáticos sobre el suelo dependen de factores geométricos de los medios, de la resistencia del suelo, así como de parámetros operacionales. Por medio de los modelos empíricos solo una aproximación de los esfuerzos puede obtenerse considerando que este método se limita al análisis simplificado de los sistemas. Los modelos en elementos finitos resultan apropiados para realizar la modelación de la compactación del suelo y predecir el efecto sobre el suelo del tráfico de neumáticos, pero su aplicación a soluciones dinámicas relacionadas al movimiento del suelo y su fractura ha sido abordada con más éxito por el método de elementos discretos, el cual tiene en cuenta la naturaleza discreta y granular del suelo.

La introducción de nuevos sistemas de rodamiento en las máquinas agrícolas e implementos de labranza de suelo requiere un considerable y costoso número de ensayos en condiciones de laboratorio y pruebas de campo. Este proceso incluye además la construcción y modificación de prototipos, así como un

importante y complejo grupo de instalaciones extensométricas, necesarias para determinar los esfuerzos durante la labranza. El diseño de máquinas y sistemas de rodaje agrícolas se ha fundamentado sobre costosas investigaciones de campo y por el uso de modelos matemáticos. Sin embargo, los modelos numéricos pueden aportar mayor número de variables a analizar para la toma de decisiones, más precisión, confiabilidad y rapidez de la entrega de los resultados, dado las capacidades computacionales disponibles hoy día.

**Objetivo General:** Desarrollar modelos computacionales para la simulación de la compactación y la interacción suelo-aperos durante operaciones de labranza y tráfico de vehículos agrícolas, empleando los métodos de Elementos Finitos y Elementos Discretos.

### **Objetivos específicos**

1. Obtener las propiedades físicas y mecánicas del suelo Ferralítico rojo compactado, necesarias para el desarrollo de los modelos en elementos finitos y en elementos discretos.
2. Determinar el modelo constitutivo a emplear con el método de elementos finitos para la simulación de la respuesta mecánica del suelo Ferralítico rojo compactado.
3. Desarrollar un modelo, mediante el método de elementos finitos, para la simulación de la interacción neumático-suelo; que permita predecir el efecto sobre el suelo del tráfico de vehículos con neumáticos o ruedas agrícolas.
4. Desarrollar un modelo, mediante el método de elementos discretos, para la simulación de la interacción suelo-herramienta de labranza; que permita predecir el desempeño de aperos e implementos agrícolas durante la labranza del suelo.

### **Materiales y Métodos**

Las metodologías empleadas incluyen el desarrollo de los modelos, mediante la utilización de software profesional para el trabajo tanto en elementos finitos como en elementos discretos. Para la obtención de las propiedades del suelo se realizaron ensayos de corte directo, triaxiales y de caracterización física del suelo. Además se realizaron experimentos en condiciones de laboratorio para validar, tanto el modelo de la compactación del suelo como de las operaciones de labranza.

### **Resultados y discusión**

**Resultados de la obtención de las propiedades físicas y mecánicas del suelo Ferralítico rojo compactado necesarias para el desarrollo de los modelos en elementos finitos y en elementos discretos.**

El funcionamiento de los modelos en Elementos Finitos y Elementos Discretos depende del conocimiento del comportamiento del medio que describen, que en este caso fue un suelo Ferralítico rojo compactado. Se obtuvieron las principales propiedades físicas y mecánicas del suelo, su respuesta ante las variaciones de humedad y densidad del suelo. Las propiedades evaluadas fueron: ángulo de fricción interna, cohesión, módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y

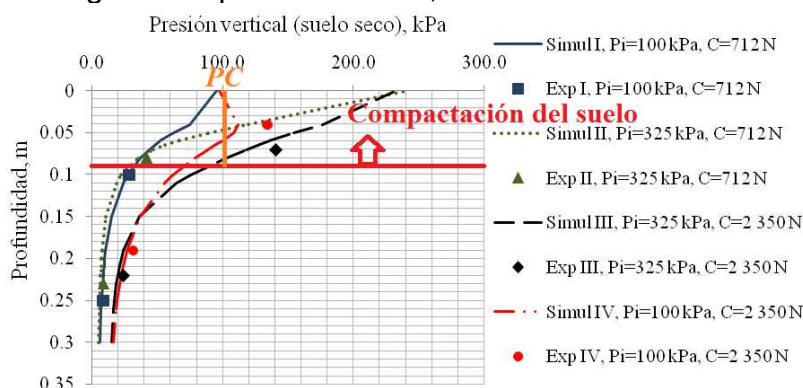
adherencia suelo-metal. Estos resultados aportan conocimientos básicos imprescindibles para la aplicación de estos métodos numéricos a este tipo de suelo, siendo aplicado ya en una investigación doctoral defendida en el Tribunal de Ciencias Técnicas Agropecuarias.

### Resultados de la determinación del modelo constitutivo a emplear, durante la implementación de modelos de suelo Ferralítico rojo compactado, mediante el Método de Elementos Finitos

La precisión de los modelos desarrollados mediante el Método de Elementos Finitos depende de la precisión con que el modelo constitutivo empleado represente la respuesta mecánica del material investigado. Se validaron los modelos constitutivos de Drucker-Prager Extendido y de Drucker-Prager Modificado, comprobándose experimentalmente que ambos modelos hacen una representación adecuada de la respuesta mecánica de los suelos Ferralíticos rojos compactados. Este constituye un resultado científico que sirve de base a la aplicación de este método a la solución de otros problemas de este tipo de suelo.

### Resultados del modelo para la simulación de la interacción neumático-suelo

La Figura 1 muestra los resultados de la simulación aplicada a un neumático agrícola, con carga entre 712 y 2 250 N, inflados a una presión de 100 y 325 kPa, en un suelo Ferralítico rojo compactado (contenido de humedad 25%). En esta figura se aprecia además, el resultado de la validación del modelo.



**Figura 1.** Resultados experimentales (Exp ) y de las simulaciones (Simul) para cada una de las combinaciones presión de inflado y carga del neumático investigadas.

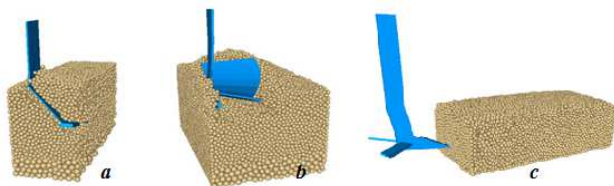
Aquí se puede observar el buen ajuste entre resultado experimental y simulación, lo cual confirma la validez del modelo. Este es un ejemplo de la aplicación del modelo, en este caso la presión límite a partir de la cual se produce compactación(PC) es de 106 kPa, esta es la presión de fluencia o límite elástico del suelo determinado experimentalmente. Presiones mayores a 106 kPa solo se obtienen hasta una profundidad de 0,09 m, por lo tanto se espera que solo se compacte el suelo hasta esta profundidad, debido a que a mayores profundidades las presiones ocasionadas por el tráfico del neumático son inferiores, por lo tanto la deformación provocada al suelo debe recuperarse y volver a su estado inicial después del tráfico del neumático.

Con la simulación es posible, conocer cuáles son las presiones verticales que provoca el vehículo en el suelo, hasta qué profundidad se producirán estas presiones, cómo influyen los parámetros geométricos y de operación de los

neumáticos, cuándo se provoca compactación del suelo, etc. Este modelo es una herramienta eficaz en la predicción del efecto sobre el suelo del tráfico de los vehículos, lo cual contribuye a la conservación de uno de los recursos no renovables más importantes de los que depende el hombre, el suelo agrícola. Este resultado se ha introducido en todas las universidades cubanas que tienen la carrera de Ingeniería Agrícola, tanto en el pregrado como en el posgrado. También se ha introducido en el grupo Empresarial AZCUBA aplicándose para estimar el efecto sobre el suelo del sistema de cosecha-transporte en alta humedad, introducido recientemente.

### Resultados del modelo para la simulación de la interacción suelo-herramienta de labranza

La Figura 2 muestra tres casos de operaciones de labranza simuladas con el modelo de la interacción suelo-herramienta. A partir de estas se obtiene, para varias condiciones en cuanto a humedad y densidad del suelo, la fuerza de tiro necesaria para realizar la operación agrícola. Se varía la geometría de la herramienta de labranza buscando la variante más eficiente energéticamente, lográndose así reducir los considerables y costosos ensayos y pruebas de campo, la construcción de gran número de prototipos, la utilización de instalaciones extensométricas y mediciones empíricas que demandan gran cantidad de recursos humanos, materiales y tiempo necesarios para realizar el diseño de aperos e implementos de labranza. Este resultado ya se aplica en la Empresa de Logística Agropecuaria del MINAG en Villa Clara para resolver problemas de diseño de máquinas agrícolas.



**Figura 2.** Simulaciones de operaciones de labranza; a) paratill, b) arado de vertedera, c) escarificador.

El modelo permite, además, predecir las fuerzas verticales sobre la superficie de contacto, posibilitando evaluar la interacción del apero con el suelo y la formación de superficies endurecidas en el fondo del surco, conocido como hardpan, la cual depende de las condiciones físicas del suelo y la geometría del órgano de trabajo.

### PRODUCCIÓN CIENTÍFICA DE LOS AUTORES EN EL TEMA DEL PREMIO

#### Publicaciones en revistas, Grupo 1

1. GONZÁLEZ, O., IGLESIAS, C. E., LÓPEZ, E., RECAREY, C. A. Y HERRERA, M. 2016. Modelling in FEM the soil pressures distribution caused by a tyre on a Rhodic Ferralsol soil. J. of Terramech, 63, 61-67.
2. GONZÁLEZ, O., IGLESIAS, C. E., RECAREY, C. A., URRIOLAGOITIASOSA, G., URRIOLAGOITIA-CALDERÓN, G., HERNÁNDEZ, L. H. Y HERRERA, M. 2013. Three dimensional finite element model of soil compaction caused by agricultural tire traffic. Computers and Electronics in Agriculture, 99, 146-152.
3. HERRERA, M., GONZÁLEZ, O., DIEGO, F., RUÍZ, J., LÓPEZ, E. Y IGLESIAS, C. E. 2013. Simulación de la respuesta mecánica del suelo en la interfase suelo-herramienta de labranza. Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia, 69, 79-88.

4. LÓPEZ, E., TIJSKENS, E., HERRERA, M., GONZÁLEZ, O. Y RAMON, H. 2014. Prediction model for non-inversion soil tillage implemented on discrete element method. Computers and electronic in agriculture, 106, 120-127.

**Publicaciones en revistas, Grupo 2**

1. GONZÁLEZ, O., HERRERA, M., IGLESIAS, C. E., DIEGO, F., URRIOLAGOITIA, G. Y HERNÁNDEZ, L. H. 2012. Modelo en elementos finitos de la interacción neumático-suelo. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, Vol. Especial 4664-671.
2. GONZÁLEZ, O., HERRERA, M., IGLESIAS, C. E. Y LÓPEZ, E. 2013. Análisis de los modelos constitutivos empleados para simular la compactación del suelo mediante el método de elementos finitos. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 22(3), 75-80.
3. GONZÁLEZ, O., HERRERA, M., IGLESIAS, C. E. Y LÓPEZ, E. 2014. Modelos constitutivos Drucker Prager Extendido y Drucker Prager Modificado para suelos Rhodic Ferralsol. Terra Latinoamericana, 32283-290.
4. GONZÁLEZ, O., IGLESIAS, C. E., HERRERA, M., LÓPEZ, E. Y SÁNCHEZ, A. 2008. Influencia de la humedad en parámetros elastoplásticos empleados para la modelación de la compactación del suelo. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 17(3), 26-30.
5. GONZÁLEZ, O., IGLESIAS, C. E., HERRERA, M., LÓPEZ, E. Y SÁNCHEZ, A. 2009. Influencia de la densidad de volumen en parámetros elastoplásticos empleados para la modelación de la compactación del suelo. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 18(1), 69-75.
6. GONZÁLEZ, O., IGLESIAS, C. E., HERRERA, M., URRIOLAGOITIA, G. Y HERNÁNDEZ, L. H. 2011. Análisis de investigaciones realizadas para modelar la compactación del suelo agrícola. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias., 20(2), 70-74.
7. HERRERA, M., IGLESIAS, C. E., GONZÁLEZ, O., LÓPEZ, E. Y SÁNCHEZ, A. 2008a. Propiedades mecánicas de un Rhodic Ferralsol requeridas para la simulación de la interacción suelo implemento de labranza mediante el Método de Elementos Finitos: Parte I. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 17(3), 31-38.
8. HERRERA, M., IGLESIAS, C. E., GONZÁLEZ, O., LÓPEZ, E. Y SÁNCHEZ, A. 2008b. Propiedades mecánicas de un Rhodic Ferralsol requeridas para la simulación de la interacción suelo implemento de labranza mediante el Método de Elementos Finitos: Parte II. Interfase suelo-herramienta. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 17(4), 50-54.
9. HERRERA, M., IGLESIAS, C. E., GONZÁLEZ, O., LÓPEZ, E. Y SÁNCHEZ, A. 2008c. Simulación mediante el Método de Elementos Finitos de la respuesta mecánica de un Ferralítico rojo compactado. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 17(2), 55-61.
10. LÓPEZ, E., HERRERA, M., GONZÁLEZ, O., IGLESIAS, C. E. Y RAMON, H. 2016. Effect of moisture and soil compaction on tillage operations. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 25(1), 32-37.
11. LÓPEZ, E., HERRERA, M., GONZÁLEZ, O., TIJSKENS, E. Y RAMON, H. 2012a. Determination of basics mechanical properties in a tropical clay soil as a function of dry bulk density and moisture. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 21(3), 5-11.
12. LÓPEZ, E., HERRERA, M., GONZÁLEZ, O., TIJSKENS, E. Y RAMON, H. 2012b. Simulación numérica de la interacción suelo-apero mediante el

- Método de Elementos Discretos. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 21(4), 5-11.
13. LÓPEZ, E., HERRERA, M., GONZÁLEZ, O., TIJSKENS, E. Y RAMON, H. 2013. Formulación de un modelo friccionante-cohesivo de suelo por el método de elementos discretos. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 22(3), 12-17.
14. LÓPEZ, E., HERRERA, M., GONZÁLEZ, O., TIJSKENS, E. Y RAMON, H. 2014. Influence of soil moisture and dry bulk density on the engineering properties of an Ferralítico rojo compactado soil. Ingeniería Agrícola, 4(2), 22-26.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAQUS 2008a. Abaqus analysis user's manual., Pawtucket, Rhode Island, Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc.
- ABAQUS 2008b. Abaqus. Theory manual. Versión 6.8, DS Simulia.
- ARVIDSSON, J. & KELLER, T. 2007. Soil stress as affected by wheel load and tyre inflation pressure. Soil & Tillage Research, 96, 284-291.
- ASAF, Z., RUBINSTEIN, D. & SHMULEVICH, I. 2007. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage. Soil Till. Res., 92, 227-242.
- BAI, Z. G., DENT, D. L., OLSSON, L. & SCHAEPMAN, M. E. 2008. Global assessment of land degradation and improvement 1: Identification by remote sensing. In: FAO/ISRIC (ed.). Rome/Wageningen. : FAO/ISRIC.
- BARZEGAR, A. R., HASHEMI, A. M., HERBERT, S. J. & ASOODAR, M. A. 2004. Interactive effects of tillage system and soil water content on aggregate size distribution for seedbed preparation in Fluvisols in southwest Iran. Soil Till. Res., 78, 45-52.
- BIRIS, S. S., VLADUT, V., UNGUREANU, N., PARASCHIV, G. & VOICU, G. 2009. Development and experimental testing of a FEM model for the stress distribution analysis in agricultural soil due to artificial compaction. Agriculturae Conspectus Scientificus, 74, 21-29.
- CARTER, M. R. & DANIEL, H. 2005. Conservation tillage Encyclopedia of Soils in the Environment. Oxford: Elsevier.
- CITMA. 2000. Informe de la República de Cuba a la IV Conferencia de las partes del Convenio de las Naciones Unidas de lucha contra la desertificación y la sequía. [En línea]. Disponible en <http://www.unccd.int/cop/reports/lac/national/2000/cuba-spa.pdf>. Consulta: agosto 2009.
- CUI, K., DE FOSSEZ, P. & GUY, R. 2007a. A new approach for modelling vertical stress distribution at the soil/tyre interface to predict the compaction of cultivated soils by using the PAXIS code. Soil & Tillage Research 95, 277-287.
- CUI, K., DÉFOSSEZ, P. & RICHARD, G. 2007b. A new approach for modelling vertical stress distribution at the soil/tyre interface to predict the compaction of cultivated soils by using the PLAXIS code. Soil & Tillage Research, 95, 277-287.
- CUNDAL, P. A. & STRACK, O. D. L. 1979. A discrete numerical method for granular assemblies. Geotechnique, 29, 47-65.

- CHANCELLOR, W. J. 1994. Soil physical properties. Advances in soil dynamics Volume 1. St. Joseph, Mich: ASAE.
- CHI, L., TESSIER, S., MCKYES, E. & LAGUÉ, C. 1993. Modeling mechanical behavior of agricultural soils. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 36, 1563-1570.
- DÉFOSSEZ, P. & RICHARD, G. 2002. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. Soil Till. Res., 67, 41-64.
- DESBIOLLES J.M.A., GODWIN R.J., KILGOUR J., J., B. B. S. & 295-309. 1997. An approach for prediction of draft required by primary tillage implements operating in field conditions. Agric. Eng, 66.
- DOMÍNGUEZ, M. 1986. Compactación del suelo húmedo por la acción negativa de los neumáticos de las cosechadoras de caña KTP-1, en condiciones estáticas. Revista ATAC, 1, 26-34.
- DOMÍNGUEZ, M. 1987. Compactación del suelo seco por el peso de las cosechadoras de caña KTP-1, en condiciones estáticas. Revista ATAC, 2, 38-49.
- DRUCKER, C. D., GIBSON, R. E. & HENKEL, D. J. 1957. Soil mechanics and work-hardening theories of plasticity. Transactions of ASCE, 22, 338-346.
- FAO-UNESCO 1988. Soil map of the world, reviewed legend. Roma, Italy.
- GARCÍA DE LA FIGAL, A. 1978. Estudio de las propiedades tecnológicas mas importantes de los suelos cubanos. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 3, 61-77.
- GONZÁLEZ, O. 2011. Modelación de la compactación provocada por el tráfico de neumáticos, de los vehículos agrícolas, en suelos en condiciones de laboratorio. Tesis de Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias Universidad Agraria de la Habana.
- GONZÁLEZ, O., HERRERA, M., IGLESIAS, C. E. & LÓPEZ, E. 2013a. Análisis de los modelos constitutivos empleados para simular la compactación del suelo mediante el método de elementos finitos. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 22, 75-80.
- GONZÁLEZ, O., HERRERA, M., IGLESIAS, C. E. & LÓPEZ, E. 2014. Modelos constitutivos Drucker Prager Extendido y Drucker Prager Modificado para suelos Rhodic Ferralsol. Terra Latinoamericana, 32, 283-290.
- GONZÁLEZ, O., IGLESIAS, C. E., HERRERA, M., LÓPEZ, E. & SÁNCHEZ, A. 2008. Influencia de la humedad en parámetros elastoplásticos empleados para la modelación de la compactación del suelo. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 17, 26-30.
- GONZÁLEZ, O., IGLESIAS, C. E., HERRERA, M., LÓPEZ, E. & SÁNCHEZ, A. 2009. Influencia de la densidad de volumen en parámetros elastoplásticos empleados para la modelación de la compactación del suelo. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 18, 69-75.
- GONZÁLEZ, O., IGLESIAS, C. E., HERRERA, M., URRIOLAGOITIA, G. & HERNÁNDEZ, L. H. 2011. Análisis de investigaciones realizadas para modelar la compactación del suelo agrícola. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias., 20, 70-74.
- GONZÁLEZ, O., IGLESIAS, C. E., LÓPEZ, E., RE CAREY, C. A. & HERRERA, M. 2016. Modelling in FEM the soil pressures distribution caused by a tyre on a Rhodic Ferralsol soil. J. of Terramech, 63, 61-67.
- GONZÁLEZ, O., IGLESIAS, C. E., RE CAREY, C. A., URRIOLAGOITIA-SOSA, G., URRIOLAGOITIA-CALDERÓN, G., HERNÁNDEZ, L. H. & HERRERA, M. 2013b. Three dimensional finite element model of soil compaction



- caused by agricultural tire traffic. *Computers and Electronics in Agriculture*, 99, 146-152.
- GRUJICIC, M., HE, T., PANDURANGAN, B., BELL, B. C., CHEESEMAN, B. A., ROY, W. N. & SKAGGS, R. R. 2009. Development, parameterization, and validation of a visco-plastic material model for sand with different levels of water saturation. *Proc. I. Mech. E., Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 223, 63-81.
- HAMBLETON, J. P. & DRESCHER, A. 2009. Modeling wheel-induced rutting in soils: Rolling. *J. Terramech.*, 46, 35-47.
- HAMZA, M. A. & ANDERSON, W. K. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research*, 82, 121-145.
- HELWANY, S. 2007. *Applied soil mechanics with Abaqus applications*, John Wiley & Sons, Inc.
- HERRERA, M. 2006. Simulación del comportamiento mecánico de los suelos Ferralíticos rojos mediante el Método de Elementos Finitos Tesis de Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias Universidad Agraria de la Habana.
- HERRERA, M., GONZÁLEZ, O., IGLESIAS, C. E., DE LA ROSA, A. A. & MADRUGA, R. 2010. Estudio de la exactitud del modelo hiperbólico de Duncan y Chan en la predicción de la relación esfuerzo deformación de tres suelos arcillosos cubanos. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 19, 24-29.
- HERRERA, M., IGLESIAS, C. & RODRÍGUEZ, M. 2001. Propiedades Dinámicas de los vertisuelos que intervienen en el diseño de órganos escarificadores. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 10, 29-36.
- HERRERA, M., IGLESIAS, C. E., GONZÁLEZ, O., LÓPEZ, E. & SÁNCHEZ, A. 2008a. Propiedades mecánicas de un Rhodic Ferralsol requeridas para la simulación de la interacción suelo implemento de labranza mediante el Método de Elementos Finitos: Parte I. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17, 31-38.
- HERRERA, M., IGLESIAS, C. E., GONZÁLEZ, O., LÓPEZ, E. & SÁNCHEZ, A. 2008b. Propiedades mecánicas de un Rhodic Ferralsol requeridas para la simulación de la interacción suelo implemento de labranza mediante el Método de Elementos Finitos: Parte II. Interfase suelo-herramienta. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17, 50-54.
- HERRERA, M., IGLESIAS, C. E., GONZÁLEZ, O., LÓPEZ, E. & SÁNCHEZ, A. 2008c. Simulación mediante el Método de Elementos Finitos de la respuesta mecánica de un Ferralítico rojo compactado. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17, 55-61.
- HERRERA, M., IGLESIAS, C. E., GONZÁLEZ, O., LÓPEZ, E., SÁNCHEZ, A. & DELGADO, R. Determinación de la humedad crítica de compactación de cuatro suelos agrícolas cubanos. Congreso AGROMEC, 2006 La Habana. Ministerio de la Industria Sideromecánica.
- HORNER, D. A., PETERS, J. F. & CARRILLO, A. 2001. Large scale discrete element modeling of vehicle–soil interaction. *J. Eng. Mech.*, 127, 1027–1032.
- JEAN-YVES DELENNE, M. S. E. Y. F. C. J.-C. B. 2004. Mechanical behaviour and failure of cohesive granular materials. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28, 1577-1594.

- KARMAKAR, S. & KUSHWAHA, R. L. 2006. Dynamic modeling of soil-tool interaction: An overview from a fluid flow perspective. *Journal of Terramechanics*, 43, 411-425.
- KELLER, T. 2005. A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters. *Biosystems Engineering*, 92, 85-96.
- KELLER, T., DÉFOSSEZ, P., WEISSKOPF, P., ARVIDSSON, J. & RICHARD, G. 2007a. SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil and Tillage Research*, 93, 391-411.
- KELLER, T., DÉFOSSEZ, P., WEISSKOPF, P., ARVIDSSON, J. & RICHARD, G. 2007b. SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil & Tillage Research*, 93, 391-411.
- KUMAR, P. & DEWANGAN, K. N. 2004. Deflection and contact characteristics of a power tiller tyre. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development.*, Manuscript PM 03 006.
- LIAO, C.-L., CHANG, T.-P., YOUNG, D.-H. & CHANG, C. S. 1997. Stress-strain relationship for granular materials based on the hypothesis of best fit. *International Journal of Solids and Structures*, 34, 4087-4100.
- LÓPEZ, E., TIJSKENS, E., HERRERA, M., GONZÁLEZ, O. & RAMON, H. 2014. Prediction model for non-inversion soil tillage implemented on discrete element method. *Computers and electronic in agriculture*, 106, 120-127.
- MCKYES, E. 1989. *Agricultural Engineering Soil Mechanics*, Amsterdand, Elsevier Science.
- MCKYES, E. & MASWAURE, J. 1997. Effect of design parameters of flat tillage tools on loosening of a clay soil. *Soil and Tillage Research*, 43, 195-204.
- MCKYES, E., NYAMUGAFATA, P. & NYAMAPFENE, K. W. 1994. Characterization of cohesion, friction and sensitivity of two hardsetting soils from Zimbabwe. *Soil and Tillage Research*, 29, 357-366.
- MOUAZEN, A. M. 2002. Mechanical behaviour of the upper layers of a sandy loam soil under shear loading. *J. of Terramech.*, 39, 115-126.
- MOUAZEN, A. M., RAMON, H. & BAERDEMAEKER, J. D. 2002. Effects of Bulk Density and Moisture Content on Selected Mechanical Properties of Sandy Loam Soil. *Biosystems Engineering*, 83, 217-224.
- NEMÉNYI, M., MESTERHÁZI, P. Á. & MILICS, G. 2006. An Application of Tillage Force Mapping as a Cropping Management Tool. *Bios. Eng.*, 94, 351-357.
- OLDEMAN, L. R., HAKKELING, R. T. A. & SOMBROEK, W. G. 1991. World map of the status of human-induced soil degradation. An explanatory note. In: FAO/ISRIC (ed.) *Second revised edition ed.* Wageningen.
- PINHEIRO-DICK, D. & SCHWERTMANN, U. 1996. Microaggregates from Ferralítico rojo compactados and Inceptisols: dispersion through selective dissolutions and physicochemical treatments. *Geoderma*, 74, 49-63.
- PLAXIS 2004. *Plaxis. Versión 8. Manual de referencias.* In: BRINKGREVE, R. B. J. (ed.). Delft, Netherlands: Delft University of Technology & PLAXIS b.v.
- PORTER, M. A. & MCMAHON, T. A. 1987. Simulation of change in bulk density of the cultivated layer in a swelling clay soil. *Soil and Tillage Research*, 10, 147-166.

- RAPER, R. L. & ERBACH, D. C. 1990. Effect of variable linear elastic parameters on finite element predictions of soil compaction. *Transaction of ASAE*, 33, 731-736.
- ROSCOE, K. H. & BURLAND, J. B. 1968. On the generalized stress-strain behaviour of "wet" clay. In: HEYMAN, J. Y. F. A. L. (ed.) *Engineering Plasticity*. Cambridge University Press.
- SAFFIHI-HDADI, K., DÉFOSSEZ, P., RICHARD, G., CUI, Y. J., TANG, A. M. & CHAPLAIN, V. 2009. A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. *Soil and Tillage Research*, 105, 96-103.
- SAHU, R. K. & RAHEMAN, H. 2006. Draught Prediction of Agricultural Implements using Reference Tillage Tools in Sandy Clay Loam Soil. *Biosystems Engineering*, 94, 275-284.
- SÁNCHEZ-GIRÓN, V. 1996. *Dinámica y mecánica de suelos*, Madrid, Agrotécnicas.
- SCHJØNNING, P., LAMANDÉ, M., TØGERSEN, F. A., ARVIDSSON, J. & KELLER, T. 2008. Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil–tyre interface. *Biosystems Engineering*, 99, 119-133.
- SHOOP, S. A. 2001. Finite element modeling of tire-terrain interaction.: Cold Regions Research & Engineering Laboratory, U.S. Army Corps of Engineers.
- SHRESTHA, D. S., SINGH, G. & GEBRESENBET, G. 2001. PM--Power and Machinery: Optimizing Design Parameters of a Mouldboard Plough. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 78, 377-389.
- SPOOR, G., TIJINK, F. G. J. & WEISSKOPF, P. 2003. Subsoil compaction: risk, avoidance, identification and alleviation. *Soil and Tillage Research*, 73, 175-182.
- TANAKA, H., INOOKU, K., NAGASAK, Y., MIYAZAKI, M., SUMIKAWA, O. & OIDA, A. Simulation of loosening at subsurface tillage using a vibrating type subsoiler by means of the distinct element method. Eighth European ISTVS Conference, 2000 Umea.
- TARAWALLY, M. A., MEDINA, H., FRÓMETA, M. E. & ITZA, C. A. 2004. Field compaction at different soil-water status: effects on pore size distribution and soil water characteristics of a Rhodic Ferralsol in Western Cuba. *Soil Till. Res*, 76, 95-103.
- TIJSKENS, E., RAMON, H. & BAERDEMAEKER, J. D. 2003. Discrete element modelling for process simulation in agriculture. *Journal of Sound and Vibration* 266 493-514.
- TORMENA, C. A., DA SILVA, A. P. & LIBARDI, P. L. 1999. Soil physical quality of a Brazilian Ferralítico rojo compactado under two tillage systems using the least limiting water range approach. *Soil and Tillage Research*, 52, 223-232.
- TROUSE, A. C. 1985. Development of the controlled traffic concept. *Proceedings of International Conference on Soil Dynamics*, 1112 -1119.
- UTILI, S. & NOVA, R. 2008. DEM analysis of bonded granular geomaterials. *Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32, 1997-2031.

- VAN DEN AKKER, J. J. H. 2004. SOCOMO: a soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity. *Soil & Tillage Research*, 79, 113-127.
- WAGLE, S. G. 2006. Die compaction simulation: simplifying the application of a complex constitutive model using numerical and physical experiments. PhD Thesis, The Pennsylvania State University.
- WAKAI, A., GOSE, S. & UGAI, K. 1999. 3-D elasto-plastic finite element analyses of pile foundations subjected to lateral loading. . *Soils and Foundation*, 39, 97-111.
- WULFSOHN, D. & ADAMS, B. A. 2002. Elastoplastic soil mechanics. *Advances in Soil Dynamics Volume 2*. St. Joseph, Michigan.: ASAE.
- YAO, Y. & ZENG, D. 1988. Investigation on the relationship between sliding speed and soil-metal friction. *Trans. Chinese Soc. Agric.Math.*, 19, 33-40.