

Predicción de Fuerza Traccional de herramienta de labranza estrecha mediante el Método de Elementos Finitos

Draft Force Prediction of Narrow Tillage Tool Using the Finite Element Method



CU-ID: 2177/v31n3e06

Luis Orlando Marín Cabrera*, Armando Eloy García de la Figal Costales, Arturo Martínez Rodríguez

Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA); Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

RESUMEN: El Método de Elementos Finitos (MEF) ha sido utilizado para predecir el comportamiento del suelo removido por la herramienta de labranza, así como la fuerza de tracción necesaria para su rompimiento. El objetivo del presente trabajo es analizar, mediante un modelo de simulación de la interacción suelo-herramienta de labranza en elementos finitos, el comportamiento de la fuerza de tracción de la herramienta de labranza estrecha de un subsolador vibratorio, labrando un bloque de suelo Ferralítico (Rhodic Ferralsol) y utilizando la forma lineal del modelo elastoplástico de relación constitutiva de Drucker-Prager extendido. El software empleado fue *Solid Works* y su complemento *Simulation* para modelar, tanto la herramienta del subsolador como el bloque de suelo. Las propiedades mecánicas del suelo fueron asignadas al modelo de simulación, en función de la humedad, densidad, profundidad de trabajo y velocidad de avance de $0,65 \text{ ms}^{-1}$. Los resultados mostraron la confiabilidad del MEF para predecir el comportamiento de los esfuerzos de tracción de esta herramienta de labranza.

Palabras clave: MEF, fuerza de tracción, modelo de simulación, propiedades mecánicas del suelo.

ABSTRACT: The Finite Element Model (FEM) has been used to predict the soil behavior disturbed by tillage tool, as well as the necessary draft force to break it. The aim of the present work is to analyze, by a simulation model of soil-tillage tool interaction in finite element, the draft force behavior of the vibratory subsoiler bent leg (narrow farming tillage tool), tilling a Ferralitic soil block, using the linear form to the extended Drucker-Prager elastoplastic constitutive relation model. The software used was *Solid Works* and its complement *Simulation* to model the vibratory bent leg and the soil block. The mechanical properties of soil were determined in the soil box CS-CEMA-25 and assigned to simulation model which was analyzed in function of moisture, bulk density, working depth and forward speed. The results showed the FEM reliability to predict the draft forces behavior of narrow tillage tool.

Keywords: FEM, Simulation Model, Soil Mechanical Properties.

INTRODUCCIÓN

La labranza, en el sentido agrícola, es la manipulación física del suelo para lograr las condiciones requeridas del mismo, necesarias para un crecimiento adecuado de las plantas y producción de las cosechas (Rao & Chaudhary, 2018), es uno de los mayores consumidores de energía de la producción agrícola (Dehghan & Kalantari, 2016), cerca de la mitad de la energía utilizada es consumida en la operación de cultivo debido a la magnitud de las fuerzas de corte generadas cuando se rompe o

desmenuza el suelo (Armin *et al.*, 2015), debido al tráfico de la maquinaria agrícola y la consiguiente compactación (Mileusnić *et al.*, 2022).

La predicción de los esfuerzos de corte, distribución y tamaño de los terrones y la erosión del suelo debida al cultivo está entre las mayores motivaciones para la simulación de la interacción suelo-herramienta de labranza. La combinación de los datos de campo y los experimentos de laboratorio con modelos matemáticos, permiten pronósticos más rápidos y precisos la interacción de nuevos diseños de herramientas con el suelo (López, 2012).

*Autor para correspondencia: Luis Orlando Marín Cabrera, e-mail: luismc@unah.edu.cu

Recibido: 16/12/2021

Aceptado: 24/06/2022

En la modelación del cultivo del suelo, modelos experimentales y analíticos aparecieron en los años cuarenta del pasado siglo (Terzaghi, 1943). Posteriormente, la predicción de las fuerzas de cultivo fue investigada por los métodos numéricos, los cuales han adquirido auge en las últimas décadas debido al desarrollo acelerado de las técnicas de cómputo (Herrera et al., 2015). De los métodos numéricos, el Método de Elementos Finitos (MEF) ha tenido gran aceptación para la simulación computacional de la interacción suelo-herramienta de labranza de acuerdo a González et al. (2013a; 2013b), debido a su potencial para describirla en 3D, según Herrera et al. (2013); Naderi et al. (2013); Ibrahmi et al. (2015); Marín & García de la Figal (2019); reportándose resultados satisfactorios en la modelación de la resistencia estructural de la herramienta por Biris et al. (2016); Constantin et al. (2019); Gheorghe et al. (2019), predicción de los esfuerzos de la herramienta de labranza sobre el suelo según Arefi et al. (2022) y la fuerza de tracción en condiciones estáticas (López et al., 2019). Puede utilizarse para simular suelos cohesivos, con lo cual es posible obtener tanto las características de resistencia como datos en el proceso de destrucción y desplazamiento de la masa de suelo (Lysych, 2019).

El MEF es apropiado para el análisis continuo, aunque las deformaciones del suelo, sobre todo en el proceso del cultivo, que incluye la separación y mezcla de capas del mismo, la aparición de grietas, y el flujo de partículas no pueden modelarse apropiadamente por el este método (Jakasania et al., 2018). Sin embargo, los resultados en la dirección del movimiento de avance (tracción) bajo la profundidad del cultivo son más precisos cuando se utiliza el MEF (Ucgul et al., 2018).

Se analiza la predicción del comportamiento de los esfuerzos de corte en la dirección del movimiento de avance de una herramienta de labranza (subsolador vibratorio) labrando un suelo arcilloso limoso (ferralítico) con velocidades de avance y profundidades de trabajo asignadas, así como propiedades físicas (humedad, densidad) y mecánicas del suelo determinadas, mediante el MEF, como objetivo principal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelo del suelo. La forma lineal del modelo de Drucker-Prager extendido (De la Rosa et al., 2016), fue utilizada para modelar el suelo (Fig.1) y clasificado como un material elastoplástico, como un Rhodic Ferralsol, según FAO- UNESCO (1988); Oxisol según Soil Survey Staff (2010); y como Ferralítico rojo típico, según la tercera clasificación genética de suelos en Cuba (Hernández et al., 1999). Por su textura, se puede considerar como una arcilla loamosa muy plástica, con 17% de arena, 36% de limo, 47% de arcilla y contenido de materia orgánica 2,58% (Herrera et al., 2008b; 2008a). Según Naderi et al. (2013); Ibrahmi et al. (2017); Arefi et al., (2022) este modelo es el más adecuado para la modelación del material suelo, pues puede ser calibrado obteniendo datos de pruebas triaxiales. La función de fluencia del modelo de Drucker y Prager (1952) lineal se expresa como:

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = t - p \times \tan\beta \quad (1)$$

Propiedades y parámetros del suelo. El módulo de elasticidad (E) se determinó como el módulo tangente a la sección de deformación elástica, de la curva esfuerzo deformación del suelo en su tramo recto, obtenida por Herrera et al. (2008b; 2008a) para este tipo de suelo. El coeficiente de Poisson se determinó mediante la ecuación:

$$\nu = \frac{E}{2 \times G} - 1 \quad (2)$$

El módulo cortante G se determina por:

$$G = \frac{E}{2 \times (1 + \nu)} \quad (3)$$

Las propiedades o parámetros requeridos por el modelo MEF (Tabla 1) han sido obtenidas en el laboratorio de mecánica de suelos de la Empresa de Investigaciones Aplicadas a la Construcción de Villa Clara (ENIA.VC).

Modelo de elementos finitos. Está formado por la herramienta de labranza (brazo escarificador y cuña delantera de corte) el cual es tratado como cuerpo rígido y el bloque de suelo (deformable en interacción con la herramienta). Tanto el brazo como el bloque de suelo fueron modelados utilizando el software de

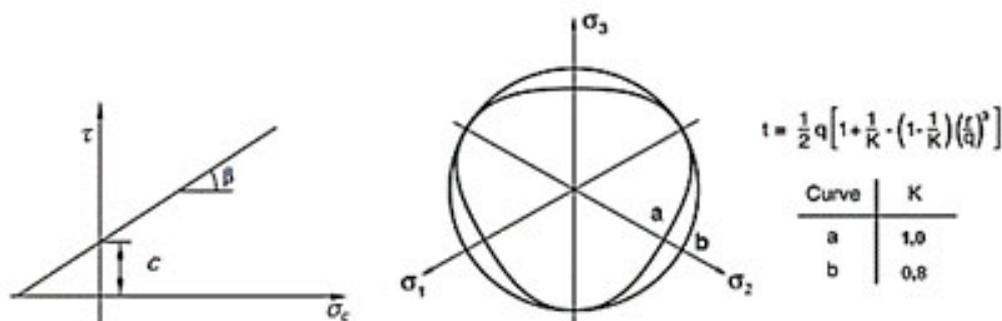


FIGURA 1. Superficie de fluencia y dirección del flujo en el plano meridional del modelo Drucker-Prager extendido lineal.

diseño *Solid Works* y su complemento *Simulation*. Las dimensiones del bloque de suelo son: longitud (2 m), ancho (1 m) y altura (1 m). El bloque de suelo se consideró isotrópico y homogéneo, tiene restricciones de movimiento por las superficies laterales, inferior y posterior (Fig. 2a), a las cuales se aplicaron presiones de confinamiento. Sobre el modelo actúan la fuerza de gravedad y la presión atmosférica. Se asume que el aumento de las dimensiones del prisma de suelo cortado más allá de las asignadas no afecta las fuerzas de corte (Bentaher *et al.*, 2013). La interacción suelo-herramienta se modeló tangencialmente a la superficie de ataque de la herramienta, con modelo de contacto superficie a superficie. El mallado general del modelo se realizó con un tamaño de elementos (e) máximo de 0,008 m, tamaño mínimo de 0,006 m y se utilizó el método iterativo de Newton-Raphson. Las superficies en contacto, tanto de la herramienta como del prisma de suelo cortado se discretizaron aplicando control de mallado, con tamaño de elementos de 0,004 m (Fig. 2b). La herramienta estrecha corta el bloque de

suelo a velocidad constante de 0,65 ms⁻¹ en la dirección del eje X, a una profundidad de trabajo de 0,3 m y ancho de corte 0,081 m. El suelo cortado después de la falla se desliza por encima de la superficie de la herramienta.

Comprobación del modelo. La comprobación del modelo se efectuó de forma cualitativa y cuantitativa. Para la comprobación cualitativa se comparó la geometría de deformación del suelo obtenida mediante la simulación, con la geometría típica del modelo analítico de Swick-Perumpral (Isavi, 2015). Para la comprobación cuantitativa se comparó la fuerza de tiro obtenida mediante la simulación con la calculada empleando el modelo de cálculo recomendado por la ASABE (ASAE Data D497, 2006):

$$D = Rx = F_i(A + B \cdot v + C \cdot v^2) \cdot w \cdot d \quad (4)$$

donde:

D = Componente horizontal de la fuerza de tiro requerida por el implemento, N;

TABLA 1. Propiedades y parámetros requeridos por el modelo MEF

Propiedad o parámetro	Símbolo	Dimensión	Fuente
Ángulo de fricción interna	φ	27,19°	Herrera <i>et al.</i> (2015)
Módulo de elasticidad	E	104 272 kPa	Herrera <i>et al.</i> (2008)
Coefficiente de Poisson	ν	0,44	Calculado
Tensión de flexión	σ_f	693,2 kPa	González <i>et al.</i> (2014)
Cohesión	d	217,2 kPa	González <i>et al.</i> (2014)
Ángulo de dilatación	Ψ	13°	González, 2011
Resistencia a los esfuerzos cortantes	τ	40 kPa	Herrera, 2006
Módulo cortante	G	1 793, 4 kPa	Calculado
Tipo de suelo		Lineal elástoplástico	
Límite de tracción del suelo	σ_t	42 kPa	Calculado
Límite de compresión del suelo	σ_c	500 kPa	Calculado
Ángulo de fricción suelo-metal	δ	23,68°	Herrera <i>et al.</i> (2015)
Coefficiente K	K	1	
Humedad	H	22,4 %	
Densidad	ρ	1 120 kg.m ⁻³	(Herrera <i>et al.</i> , 2015)

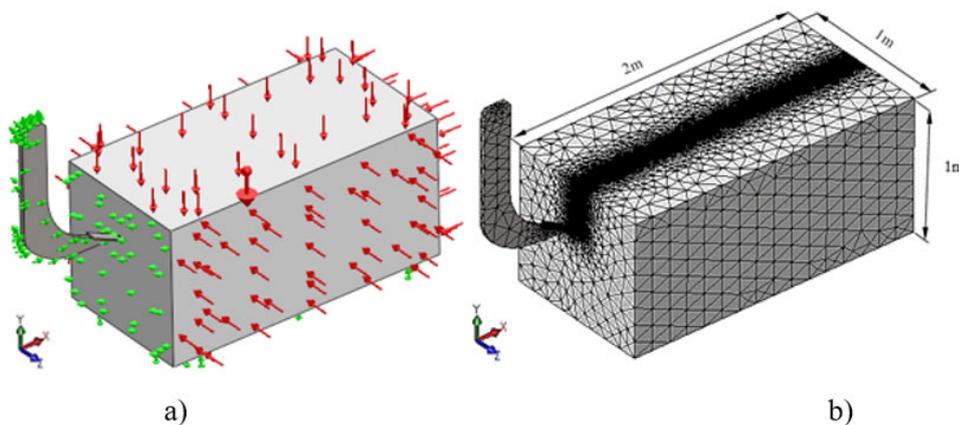


FIGURA 2. Modelo de elementos finitos: a) Condiciones de frontera b) Mallado del modelo.

F_i = Factor adimensional para el ajuste de la textura del suelo según ($i = 1$ para textura fina; 2 para textura media o 3 para textura gruesa del suelo);
 $A, B, y C$ = Constantes específicas para cada implemento;
 v = Velocidad de traslación, km.h^{-1} ;
 d = Profundidad de la labor, m;
 w = Ancho de trabajo de la máquina (m) o número de hileras o herramientas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Simulaciones por elementos finitos. El comportamiento de la fuerza de tracción a lo largo de su recorrido fue analizado mediante simulaciones por el MEF. En la [Figura 3](#) se muestran algunos pasos del proceso de corte del suelo. Se puede observar que, a medida que la herramienta de labranza estrecha avanza a través del bloque de suelo, grandes desplazamientos ocurren, tanto en sentido longitudinal, transversal como vertical, venciendo las fuerzas de resistencia del mismo, produciéndose el rompimiento del prisma de suelo. Coincidiendo con otros autores [Bentaher et al. \(2013\)](#); [Ibrahmi et al. \(2015\)](#); [Arefi et al. \(2022\)](#), puede observarse que el modelo simula el proceso de corte del suelo de forma adecuada.

En la [Fig. 4](#) se presenta un gráfico del comportamiento de la fuerza de tiro a lo largo del

recorrido de la herramienta a través del bloque de suelo.

Puede apreciarse que la fuerza de tiro alcanza un valor máximo de 14,1 kN a 0,25 m del comienzo del contacto de la herramienta con el bloque de suelo, disminuyendo en forma asintótica a medida que se desplaza la herramienta a través del bloque de suelo ([Fig.4](#)) hasta alcanzar un valor aproximadamente constante cercano a 10 kN. Casi al final del recorrido de la misma, cuando la herramienta va perdiendo el contacto con el bloque, la fuerza de tiro disminuye bruscamente hasta alcanzar un mínimo valor.

La comprobación cualitativa del modelo de elementos finitos, como se expuso anteriormente, se basó en la comparación geométrica con el modelo analítico de [Swick & Perumpral \(1988\)](#), el cual tiene en cuenta la velocidad de avance, cuya geometría se caracteriza por una zona de falla que cuenta con una cuña central y dos lados crecientes ([Fig. 5](#)) y un plano de ruptura recto en el fondo.

La [Fig. 6 a](#) muestra la formación de la zona de falla del modelo en elementos finitos a 0,6 m de recorrido de la herramienta a través del bloque de suelo, observándose que la misma adquiere una forma similar al modelo analítico de Swick-Perumpral, apreciándose claramente en el plano superior del bloque, el perfil en forma de arco de la zona de falla del suelo removido por la herramienta de labranza.

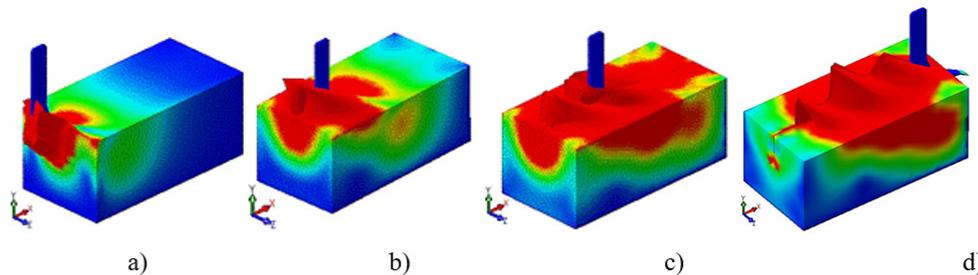


FIGURA 3. Pasos del proceso del corte del suelo por la herramienta de labranza: a) A 0,15 m de desplazamiento; b) 0,6 m; c) 1 m; d) 2 m.

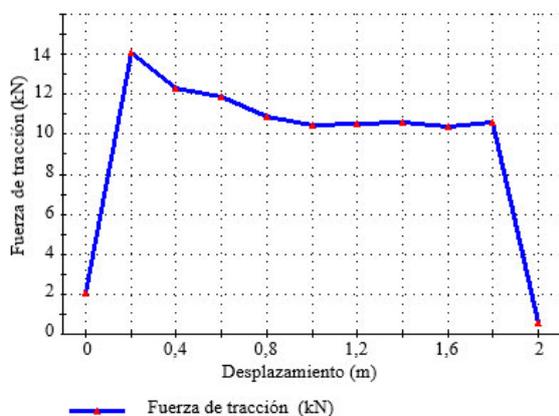


FIGURA 4. Comportamiento de la fuerza de tracción a lo largo del recorrido de la herramienta.

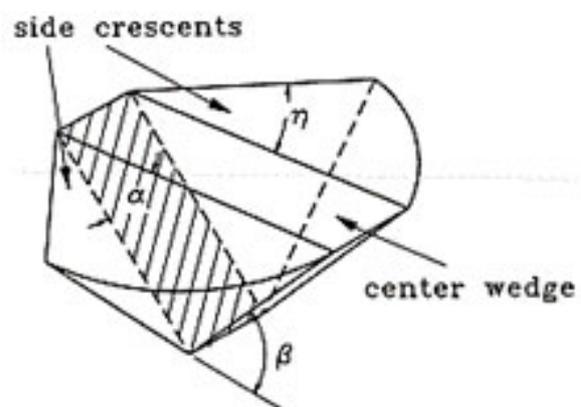


FIGURA 5. Modelo analítico de Swick-Perumpral ([Swick & Perumpral, 1988](#)).

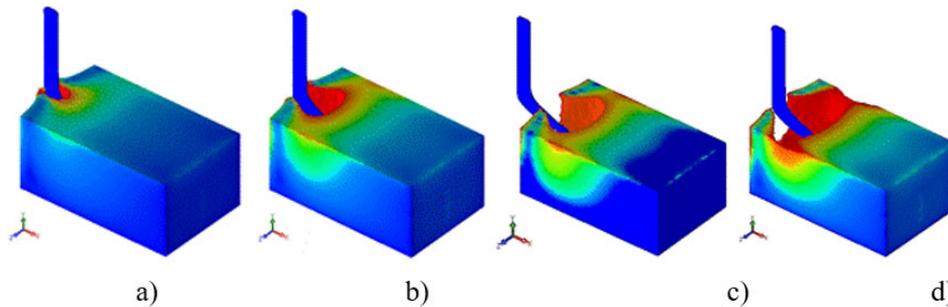


FIGURA 6. Comprobación del modelo MEF: a) Comienzo de la formación de la zona de falla del suelo; b) c) y d) Suelo removido de la zona de falla, hasta 0,6 m de recorrido de la herramienta, a través del bloque de suelo.

Con relación a la comprobación cuantitativa, se obtuvo mediante la evaluación de la [expresión \(4\)](#), un valor de la fuerza de tiro $D=10,6$ kN, coincidiendo notablemente con el valor obtenido en la simulación ([Fig.4](#)).

CONCLUSIONES

El comportamiento de los esfuerzos de tracción del subsolador a lo largo del recorrido a través del bloque de suelo muestra coincidencia con los trabajos realizados en investigaciones previas. La fuerza aumenta bruscamente al inicio de la interacción suelo-herramienta de labranza, alcanzando su valor máximo de 14,1 kN. Luego se estabiliza en valores un poco menores que el máximo, a medida que se desplaza la herramienta, con tendencia al decrecimiento y disminuye a casi cero al final del recorrido de esta.

El modelo FEM muestra similitud con el modelo analítico de Swick-Perumpral en el proceso de formación de la zona de falla del suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AREFI, M.; KARPARVARFARD, S.H.; AZIMI, N.H.; NADERI, B.M.: “Draught force prediction from soil relative density and relative water content for a non-winged chisel blade using finite element modelling”, *Journal of Terramechanics*, 100: 73-80, 2022, ISSN: 0022-4898, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2022.01.001>.
- ARMIN, A.; FOTOUHI, R.; SZYSZKOWSKI, W.: “On the FE modeling of soil-blade interaction in tillage operations”, *Finite elements in analysis and design*, 92: 1-11, 2014, ISSN: 0168-874X.
- BENTAHER, H.; IBRAHMI, A.; HAMZA, E.; HBAIEB, M.; KANTCHEV, G.; MAALEJ, A.; ARNOLD, W.: “Finite element simulation of moldboard-soil interaction”, *Soil and Tillage Research*, 134: 11-16, 2013a, ISSN: 0167-1987.
- BENTAHER, H.; IBRAHMI, A.; HAMZA, E.; HBAIEB, M.; KANTCHEV, G.; MAALEJ, A.; ARNOLD, W.: “Finite element simulation of moldboard-soil interaction”, *Soil and Tillage Research*, 134: 11-16, 2013b, ISSN: 0167-1987.
- BIRIŞ, S.; MAICAN, E.; VLĂDUŢ, V.; BUNGESCU, S.; UNGUREANU, N.; VLA, D.: “Stress and strains distribution in the frame of agricultural cultivators using the Finite Element Method.”, En: *Proceedings of the 44th International Symposium on Agricultural Engineering: Actual Tasks on Agricultural Engineering, Opatija, Croatia, 23-26 February 2016*, Ed. University of Zagreb, Faculty of Agriculture, Opatija, Croatia, pp. 111-117, 2016.
- CONSTANTIN, G.A.; VOICU, G.; OLAC, B.; ILIE, F.; PARASCHIV, G.: “Structural analysis with finite elements of a subsoiler working part.”, En: *International Symposium, ISB-INMA-TEH, Agricultural and Mechanical Engineering, Bucharest, Romania, 31 October-1 November 2019.*, Ed. INMA Bucharest, Bucharest, Romania, pp. 89-95, 2019.
- DE LA ROSA, A.A.A.; ALCOCER, Q.P.M.; GONZÁLEZ, C.O.; MASAGUER, R.A.; HERRERA, S.M.: “Adjustment of the plastic parameters of the Extended Drucker Prager model for the simulation of the mechanical response of a clayey soil (Vertisol)”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(3): 4-12, 2016, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- DEHGHAN, H.H.; KALANTARI, D.: “Design a biomimetic disc using geometric features of the claws”, *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 18(1): 103-109, 2016, ISSN: 1682-1130.
- DRUCKER, D.C.; PRAGER, W.: “Soil mechanics and plastic analysis or limit design”, *Quarterly of applied mathematics*, 10(2): 157-165, 1952, ISSN: 0033-569X.
- FAO- UNESCO: *Soil map of the world, reviewed legend*, Ed. FAO, Report 80 ed., Roma. Italia, 1988.
- GHEORGHE, G.; PERSU, C.; GAGEANU, I.; CUJBESCU, D.: “Structural and modal analysis of the subsoiler equipment to prepare the germinative bed.”, En: *Proceedings of the 47th International*

- Symposium, Actual Tasks on Agricultural Engineering, 5-7 March 2019, Opatija, Croatia*, Ed. University of Zagreb, Faculty of Agriculture, pp. 79-87, 2019.
- GONZÁLEZ, C.O.; HERRERA, S.M.; IGLESIAS, C.C.E.; LÓPEZ, B.E.: “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, 2013a, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- GONZÁLEZ, C.O.; HERRERA, S.M.; IGLESIAS, C.C.E.; LÓPEZ, B.E.: “Modelos constitutivos drucker prager extendido y drucker prager modificado para suelos rhodic ferralsol”, *Terra Latinoamericana*, 32(4): 283-290, 2014, ISSN: 0187-5779.
- GONZÁLEZ, C.O.; IGLESIAS, C.C.E.; RECAREY, M.C.A.; URRIOLAGOITIA, S.G.; HERNÁNDEZ, G.L.H.; URRIOLAGOITIA, C.G.: “Three dimensional finite element model of soil compaction caused by agricultural tire traffic”, *Computers and electronics in agriculture*, 99(1): 146-152, 2013b, ISSN: 0168-1699.
- HERNÁNDEZ, J.A.; PÉREZ, J.M.; MESA, N.Á.; FUENTES, A.E.; BOSCH, I.D.: *Nueva versión de la clasificación genética de los suelos de Cuba.*, Ed. AGRINFOR, La Habana, Cuba, 64 p., 1999, ISBN: 978-959-246-022-5.
- HERRERA, S.M.; GONZÁLEZ, C.O.; DIEGO, N.F.; RUIZ, V.J.; LÓPEZ, B.E.; IGLESIAS, C.C.E.; SÁNCHEZ, I.A.: “Simulación de la respuesta mecánica del suelo en la interfase suelo-herramienta de labranza”, *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (69): 77-88, 2013, ISSN: 0120-6230.
- HERRERA, S.M.; IGLESIAS, C.C.E.; GONZÁLEZ, C.O.; LÓPEZ, B.E.: “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, 2008a, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- HERRERA, S.M.; IGLESIAS, C.C.E.; GONZÁLEZ, C.O.; LÓPEZ, B.E.; SÁNCHEZ, I.A.: “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, 2008b, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- HERRERA, S.M.; IGLESIAS, C.C.E.; JARRE, C.C.; LEÓN, S.Y.; LÓPEZ, B.E.; GONZÁLEZ, C.O.: “Predicción de la resistencia del suelo durante la labranza mediante los modelos de presiones pasivas”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(3): 5-12, 2015, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- IBRAHMI, A.; BENTAHER, H.; HAMZA, E.; MAALEJ, A.; MOUAZEN, A.M.: “3D finite element simulation of the effect of mouldboard plough’s design on both the energy consumption and the tillage quality”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(1): 473-487, 2017, ISSN: 1433-3015.
- IBRAHMI, A.; BENTAHER, H.; HBAIEB, M.; MAALEJ, A.; MOUAZEN, A.M.: “Study the effect of tool geometry and operational conditions on mouldboard plough forces and energy requirement: Part 1. Finite element simulation”, *Computers and Electronics in Agriculture*, 117: 258-267, 2015, ISSN: 0168-1699.
- ISAVI, S.: “Assessment of some of models for predicting soil forces On narrow tillage tools”, En: *International Conference on Research in Science and Technology*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2015.
- JAKASANIA, R.G.; JAKASANIA, Y.; PRAMOD, M.: “Soil - tillage tool interaction using numerical methods - a review”, *Acta Scientific Agriculture*, 2(10): 63-70, 2018, ISSN: 2581-365X.
- LÓPEZ, B.E.: *Simulation of soil and tillage-tool interaction by the discrete element method*, Catholic University of Leuven, Faculty of Bioscience Engineering, Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Belgium, 2012.
- LÓPEZ, B.E.; TIJSKENS, E.; GONZÁLEZ, C.O.; HERRERA, S.M.; LORENZO, J.D.; RAMON, H.: “Simulación de la descompactación de un suelo arcilloso empleando el método de elementos discretos”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 28(2), 2019, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- LYSYCH, M.N.: “Review of numerical methods for modeling the interaction of soil environments with the tools of soil tillage machines”, En: *Journal of Physics: Conference Series*, Ed. IOP Publishing, vol. 1399, p. 044014, 2019, DOI: doi:[10.1088/1742-6596/1399/4/044014](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/4/044014), ISBN: 1742-6596.
- MARÍN, C.L.O.; GARCÍA DE LA FIGAL, C.A.E.: “Model of Soil-TillageTool Interaction Using Finite Element Method”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 28(4): 40-50, 2019, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- MILEUSNIĆ, Z.I.; SALJNIKOV, E.; RADOJEVIĆ, R.L.; PETROVIĆ, D.V.: “Soil compaction due to agricultural machinery impact”, *Journal of Terramechanics*, 100: 51-60, 2022, ISSN: 0022-4898, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2021.12.002>.

- NADERI, B.M.; ALIMARDANI, R.; HEMMAT, A.; SHARIFI, A.; KEYHANI, A.; TEKESTE, M.Z.; KELLER, T.: “3D finite element simulation of a single-tip horizontal penetrometer-soil interaction. Part I: Development of the model and evaluation of the model parameters”, *Soil and Tillage Research*, 134: 153-162, 2013, ISSN: 0167-1987.
- RAO, G.; CHAUDHARY, H.: “A review on effect of vibration in tillage application”, En: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Ed. IOP Publishing, vol. 377, p. 012030, 2018, ISBN: 1757-899X.
- SOIL SURVEY STAFF: *Keys to soil taxonomy*, Ed. USDA Natural Resources Conservation Service, Washington, DC, USA, 346 p., 2010.
- SRIVASTAVA, A.K.; GOERING, C.E.; ROHRBACH, R.P.; BUCKMASTER, D.R.: “Machinery selection and management”, En: *Engineering Principles of Agricultural Machines, Second Edition*, Ed. American Society of Agricultural and Biological Engineers, p. 525, 2006, ISBN: 1-892769-50-6.
- SWICK, W.; PERUMPRAL, J.: “A model for predicting soil-tool interaction”, *Journal of Terramechanics*, 25(1): 43-56, 1988, ISSN: 0022-4898.
- TERZAGHI, K.: *Soil Mechanics*, Ed. Wiley, New York, USA, 1943.
- UCGUL, M.; SAUNDERS, C.; FIELKE, J.M.: “Comparison of the discrete element and finite element methods to model the interaction of soil and tool cutting edge”, *Biosystems Engineering*, 169: 199-208, 2018, ISSN: 1537-5110, DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2018.03.00](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.03.00).

Luis Orlando Marín Cabrera, Especialista, Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA), San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, mail: luismc@unah.edu.cu

Armando Eloy García de la Figal Costales, Prof. Titular. Universidad Agraria de La Habana (UNAH). Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: areloy@unah.edu.cu

Arturo Martínez Rodríguez, Prof. Titular e Inv. Titular, Prof. de Mérito. Universidad Agraria de La Habana (UNAH). Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA), San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: armaro646@gmail.com

AUTHOR CONTRIBUTIONS: Conceptualization: L. O. Marín. **Data curation:** L. O. Marín, A. García de la Figal A. Martínez. **Formal analysis:** L. O. Marín, A. García de la Figal A. Martínez. **Investigation:** L. O. Marín, A. García de la Figal A. Martínez. **Methodology:** L. O. Marín, A. García de la Figal A. Martínez. **Supervision:** A. García de la Figal A. Martínez. **Roles/Writing, original draft:** L. O. Marín, A. García de la Figal A. Martínez. **Writing, review & editing:** A. García de la Figal, A. Martínez.

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.