

Influencia de la velocidad de avance en las fuerzas de corte de un subsolador vibratorio

Influence of the Forward Speed in the Cutting Forces of a Vibrating Subsoiler



<https://cu-id.com/2177/v32n1e01>

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: En el presente trabajo se analiza el comportamiento de las fuerzas de corte (tracción y vertical) de un subsolador vibratorio labrando un suelo arcilloso limoso (ferralítico), mediante un modelo de simulación de la interacción suelo-herramienta de labranza desarrollado aplicando el Método de Elementos Finitos, utilizando la forma lineal del modelo constitutivo elastoplástico de Drucker-Prager y el software de diseño Solid Works. Se asignaron al modelo las propiedades y parámetros del suelo requeridos para la simulación, se aplicaron las condiciones de frontera y cargas actuantes, así como fue realizada la discretización del mismo. Fueron realizadas, además, las corridas del modelo de simulación para cuatro velocidades de avance (V_m) distintas (0 ms^{-1} ; $0,4 \text{ ms}^{-1}$; $0,8 \text{ ms}^{-1}$ y $1,2 \text{ ms}^{-1}$). Los resultados mostraron el comportamiento cuadrático de ambas fuerzas con el aumento de la velocidad de avance.

Palabras clave: MEF, fuerza de tracción, modelo de simulación, velocidad de avance.

ABSTRACT: In the present work, it is analyzed the behavior of the cutting forces (draft force and vertical force) of a vibrating subsoiler tilling a silt loam soil (ferralitic), by a soil-tillage interaction simulation model, developed applying the Finite Element Model and using the elastoplastic Drucker-Prager constitutive model and Solid Works design software. The soil parameters and properties required for simulation, the boundary conditions and acting loads were assigned to model and the meshing of the model was realized. Several running of the model were also realized for four forward speeds (0 ms^{-1} ; $0,4 \text{ ms}^{-1}$; $0,8 \text{ ms}^{-1}$ and $1,2 \text{ ms}^{-1}$). The results showed the quadratic behavior of both forces with the increasing of forward speed.

Keywords: FEM, Draft Force, Simulation Model, Forward Speed.

INTRODUCCIÓN

El cultivo del suelo ha sido siempre área de investigación principal en la agricultura. Como la operación de cultivo es un procedimiento para el rompimiento del suelo, la falla del mismo depende principalmente de sus propiedades físicas, geometría de la herramienta y velocidad de corte (Abu y Reeder, 2003). Los efectos de la velocidad de la herramienta de labranza sobre el suelo, tanto estáticos como dinámicos, y su influencia en las fuerzas de corte han sido analizados por varios investigadores (Ibrahmi et al., 2015; Lamia et al., 2020). El MEF ha mostrado ser capaz de simular diferentes formas de herramientas de labranza y el efecto dinámico de la velocidad de avance (Abu y Reeder, 2003; Marín et al., 2011).

El Método de Elementos Finitos (MEF) es una técnica numérica para el análisis de complejos problemas de la ingeniería, especialmente para sistemas dinámicos con grandes deformaciones y fallas (Rosa y Wulfsohn, 2002). Este método ha sido utilizado por numerosos investigadores para analizar problemas relacionados con la mecánica de suelos y la interacción entre el suelo y las herramientas de cultivo (Abo et al., 2003; 2004; Gebregziabher et al., 2007; Topakci et al., 2010). Sin embargo, para un modelado preciso del implemento de trabajo del suelo, propiedades físicas y mecánicas importantes deben ser tenidas en cuenta (Hesar y Kalantari, 2016).

*Author for correspondence: Luis Orlando Marín Cabrera. E-mail: luismc@unah.edu.cu

Recibido: 12/06/2022

Aceptado: 09/12/2022

El objetivo de este estudio es analizar, utilizando el Método de Elementos Finitos, la predicción del comportamiento de las fuerzas de corte (fuerza de tracción y vertical) de una herramienta de labranza (subsolador vibratorio) labrando un suelo arcilloso limoso (ferralítico) con velocidades de avance y profundidad de trabajo asignadas, así como propiedades físicas (humedad, densidad) y mecánicas del suelo determinadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelo del suelo

La forma lineal del modelo de Drucker-Prager extendido según [De la Rosa et al. \(2016\)](#) fue utilizada para modelar el suelo ([Fig.1](#)), el cual fue clasificado como un material elástoplástico, como un Rhodic Ferralsol según [Soil Survey Staff. \(2014\)](#); Oxisol según [Soil Survey Staff \(2010\)](#); y como Ferralítico Rojo Típico según la tercera clasificación genética de suelos en Cuba ([Hernández et al., 1999](#)). Se consideró como una arcilla loamosa muy plástica, con 15% de arena, 38% de limo, 47% de arcilla y contenido de materia orgánica 2,59% ([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:

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = t - \sigma \cdot \tan\beta c \quad (1)$$

Propiedades y parámetros del suelo

El módulo de elasticidad (E) se determinó como el módulo tangente a 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:

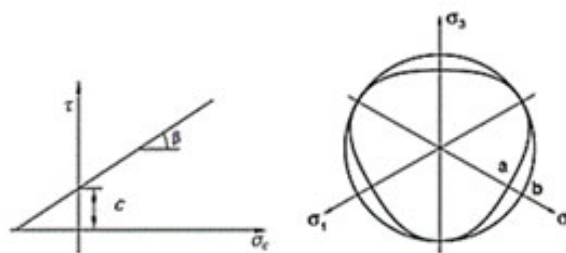


FIGURA 1. Superficie de fluencia y dirección del flujo en el plano meridional del modelo Drucker-Prager extendido lineal.

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

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 un brazo escarificador (tratado como cuerpo rígido) y el bloque de suelo (deformable en interacción con el brazo). Tanto el brazo como el bloque de suelo fueron modelados utilizando el software de diseño *Solid Works* y su complemento *Simulation*. Las dimensiones del bloque de suelo son: longitud (2 m), ancho (1 m) y altura (0,9 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](#); [Marín y García de la Figal, 2019](#)). La interacción suelo-herramienta se modeló tangencialmente a la superficie de ataque de la herramienta, con modelo de contacto superficie a

TABLA 1. Propiedades y parámetros requeridos por el modelo MEF

Propiedad o parámetro	Símbolo	Dimensión	Fuente
Ángulo de fricción interna	ϕ	27,19 °	Herrera et al. (2015)
Módulo de elasticidad	E	104 272 kPa	Herrera et al. (2008)
Coefficiente de Poisson	ν	0,44	Determinado
Cohesion	d	217,2 kPa	González et al. (2014)
Esfuerzo de flexión	σ_f	693,2 kPa	González et al. (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	Determinado
Tipo de suelo		Lineal elástoplástico	
Humedad	H	23,9 %	Herrera et al. (2008)
Ángulo de fricción suelo-metal	δ	23,68°	Herrera et al. (2015)
Densidad	ρ	1 200 kg.m ³	Determinado

superficie Se discretizó el modelo con 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). El brazo corta el bloque de suelo a velocidades constantes (V_m) 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.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelos 3D han sido desarrollados utilizando el MEF para la realización, tanto de análisis dinámico según [Abo et al. \(2003\)](#); [Mollazade et al. \(2010\)](#) como del comportamiento de herramientas de cultivo estrechas según [Payne \(1956\)](#). La mayoría de ellos se han empleado para herramientas lentas y no han tenido en cuenta los efectos de la velocidad. Para el análisis de la influencia de la velocidad de avance de la herramienta (V_m) sobre las fuerzas de corte del suelo, se evaluaron los resultados para cuatro velocidades distintas: 0 ms^{-1} ; 0,4 ms^{-1} ; 0,8 ms^{-1} y 1,2 ms^{-1} (Fig 3). Fueron realizadas varias corridas del modelo de simulación, con los parámetros de la [Tabla 1](#) y los que aparecen relacionados en la [Tabla 2](#).

El análisis realizado mostró el aumento de manera cuadrática, tanto de la fuerza de tracción (Fx) como de la fuerza vertical (Fy) con el aumento de la velocidad de avance (Fig. 4), lo cual coincide con varios autores como [Onwualu y Watts \(1998\)](#) y [Wang et al. \(2019\)](#).

CONCLUSIONES

Las fuerzas de corte del suelo, tanto vertical como de tracción, aumentan de forma cuadrática con el aumento de la velocidad de avance, siendo esta última de mayor magnitud.

El MEF ha sido capaz de simular, de forma adecuada, los efectos de la velocidad de avance de la herramienta de labranza en las fuerzas de corte del suelo.

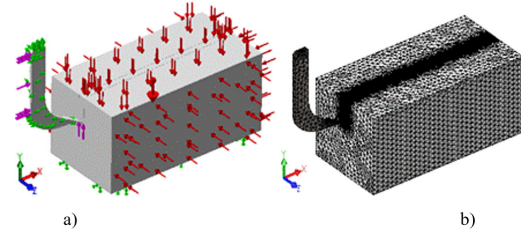


FIGURA 2. Modelo de elementos finitos:
a) Condiciones de frontera b) Mallado del modelo.

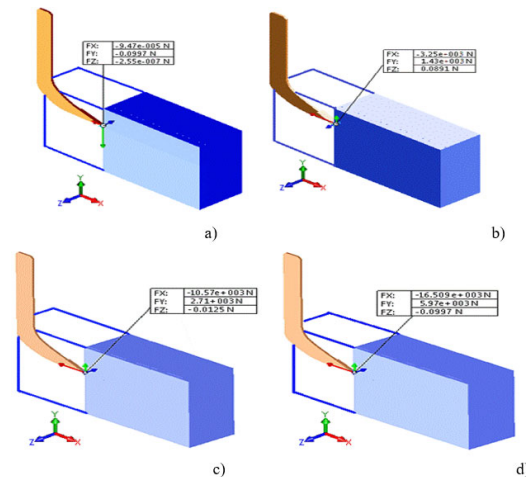


FIGURA 3. Fuerzas de corte del suelo a diferentes velocidades de avance: a) $V_m = 0 \text{ ms}^{-1}$; b) $V_m = 0,4 \text{ ms}^{-1}$; c) $V_m = 0,8 \text{ ms}^{-1}$; d) $V_m = 1,2 \text{ ms}^{-1}$.

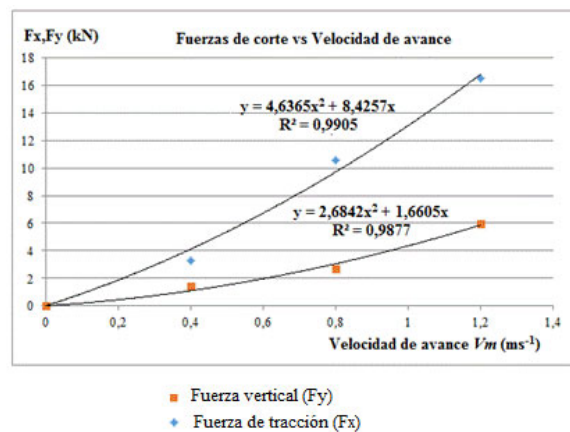


FIGURA 4. Comportamiento de las fuerzas de corte a diferentes velocidades de avance.

TABLA 2. Parámetros del brazo del modelo de simulación

NOMBRE	Categoría	Valor	Unidad	Comentario
Densidad	Simulación ▼	1.2 Σ	g/cm^3 ▼	
Humedad	Simulación ▼	23.9 Σ	N/A ▼	
Frecuencia	Simulación ▼	14 Σ	rad/d ▼	
Amplitud	Simulación ▼	11 Σ	N/A ▼	
Velocidad	Simulación ▼	Σ	N/A ▼	
	Cota del modelo ▼	0	N/A ▼	

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABO, E.M.; HAMILTON, R.; BOYLE, J.: "Simulation of soil-blade interaction for sandy soil using advanced 3D finite element analysis", *Soil and Tillage Research*, 75(1): 61-73, 2004, ISSN: 0167-1987.
- ABO, E.M.; HAMILTON, R.; BOYLE, J.T.: "3D Dynamic analysis of soil-tool interaction using the finite element method", *Journal of Terramechanics*, 40(1): 51-62, 2003, ISSN: 0022-4898.
- ABU, H.N.H.; REEDER, R.C.: "A nonlinear 3D finite element analysis of the soil forces acting on a disc plow", *Soil & Tillage Research*, (74): 115-124, 2003, ISSN: 0167-1987.
- 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>.
- 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, 2013, ISSN: 0167-1987.
- DE LA ROSA, A.A.A.; QUINTEROS, A.P.R.; GONZÁLEZ, C.O.; RODRÍGUEZ, M.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.
- 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.
- GEBREGZIABHER, S.; MOUAZEN, A.M.; VAN BRUSSEL, H.; RAMON, H.; MERESA, F.; VERPLANCKE, H.; NYSSSEN, J.; BEHAILU, M.; DECKERS, J.; ALBURQUERQUE, J.A.: "Design of the Ethiopian ard plough using structural analysis validated with finite element analysis", *Biosystems Engineering*, 97(1): 27-39, 2007, ISSN: 1537-5110.
- GONZÁLEZ, C.O.: *Modelación de la compactación provocada por el tráfico de neumáticos, de los vehículos agrícolas, en suelos en condiciones de laboratorio*, Universidad Agraria de La Habana. Centro de Mecanización Agropecuaria, Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Técnicas Agropecuarias), San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, 100 p., publisher: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Ciencias ..., 2011.
- 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.
- HERNÁNDEZ, J.A.; PÉREZ, J.J.M.; MESA, N.Á.; BOSCH, I.D.; RIVERO, L.; CAMACHO, E.: *Nueva versión de la clasificación genética de los suelos de Cuba.*, Ed. AGRINFOR, Barcaz L L ed., vol. I, La Habana, Cuba, 64 p., 1999, ISBN: 959-246-022-1.
- HERRERA, S.M.: *Simulación del comportamiento mecánico de los suelos ferralíticos rojos mediante el método de elementos finitos*, Universidad Agraria de La Habana. Centro de Mecanización Agropecuaria, Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Técnicas Agropecuarias), San José de las Lajas, La Habana, Cuba, 109 p., publisher: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Ciencias ..., 2006.
- 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.
- HESAR, H.D.; 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.
- 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 I. Finite element simulation", *Computers and Electronics in Agriculture*, 117: 258-267, 2015, ISSN: 0168-1699.
- LAMIA, A.A.D.; EL-HADDAD, Z.A.; AFIFY, M.T.: "Modeling the effect of soil-tool interaction on draft force using visual basic", *Annals of Agricultural Science, Moshtohor*, 58(2): 223-232, 2020, ISSN: 1110-0419, ISSN 1110-041, Disponible en: <https://assjm.journals.ekb.eg>.
- MARÍN, C.L.O.; LEYVA, S.O.; HERRERA, S.M.: "Efecto del modo de vibración y la velocidad de trabajo en la disminución de la resistencia traccional de los órganos escarificadores vibratorios", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(3): 57-62, 2011, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- MARÍN, C.L.O.; GARCÍA DE LA FIGAL, C.A.E.: "Model of Soil-Tillage Tool Interaction Using Finite Element Method", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 28(4): 40-50, 2019, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- MOLLAZADE, K.; JAFARI, A.; EBRAHIMI, E.: "Application of dynamical analysis to choose best subsoiler's shape using ANSYS", *New York Science Journal*, 3(3): 93-100, 2010.
- 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.
- ONWUALU, A.P.; WATTS, K.C.: "Draught and vertical forces obtained from dynamic soil cutting by plane tillage tools", *Soil and Tillage Research*, 48(4): 239-253, 1998, ISSN: 0167-1987.
- PAYNE, P.: "The relationship between the mechanical properties of soil and the performance of simple cultivation implements", *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1(1): 23-50, 1956.
- ROSA, U.; WULFSOHN, D.: "Application of the finite element method in agricultural soil mechanics", En: *Advances in Soil Dynamics Volume 2*, Ed. American Society of Agricultural and Biological Engineers, p. 117, 2002, ISBN: 1-892769-82-4.
- SOIL SURVEY STAFF: *Keys to soil taxonomy*, Ed. USDA Natural Resources Conservation Service, Washington, DC, USA, 346 p., 2010.
- SOIL SURVEY STAFF: *Keys to Soil Taxonomy*, Ed. Government Printing Office, USDA Natural Resources Conservation Service ed., Washington, DC, USA, 346 p., 2014, ISBN: 0-16-092321-2.
- TOPAKCI, M.; CELIK, H.K.; CANAKCI, M.; RENNIE, A.; AKINCI, I.; KARAYEL, D.: "Deep tillage tool optimization by means of finite element method: Case study for a subsoiler tine", *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 8(2): 531-536, 2010, ISSN: 1459-0255.
- WANG, Y.; OSMAN, A.N.; ZHANG, D.; YANG, L.; CUI, T.; ZHONG, X.: "Optimized design and field experiment of a staggered vibrating subsoiler for conservation tillage", *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(1): 59-65, 2019, ISSN: 1934-6352.

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

Armando Eloy García de la Figal Costales. Dr.C., 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. Dr.Cs., 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.

The authors of this work declare no conflict of interests.

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.

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.