

Modelo en elementos finitos de la interacción neumático-suelo

Omar González Cueto^{1§}, Miguel Herrera Suárez², Ciro E. Iglesias Coronel³, Fidel Diego Navas⁴, Guillermo Urriolagoitia Sosa⁵ y Luis Héctor Hernández Gómez⁶

¹Departamento de Ingeniería Agrícola. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Santa Clara, VC, Cuba. ²Departamento de Ingeniería Agrícola. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Santa Clara, VC, Cuba. (miguelhs@uclv.edu.cu). ³Centro de Mecanización Agropecuaria. Universidad Agraria de la Habana, San José, Mayabeque, Cuba. (ciro@isch.edu.cu). ⁴Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, IPN, Oaxaca, México. (fdiego1954@yahoo.com). ⁵Estudios de Posgrado e Investigación, ESIME. Zacatenco, IPN, México, D. F. (guiurri@hotmail.com). Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, ESIME. Zacatenco, IPN, México, D. F. (luishector56@hotmail.com). [§]Autor para correspondencia: omar@uclv.edu.cu.

Resumen

En el presente trabajo se desarrolló un modelo, válido para la simulación de la interacción neumático-suelo, mediante el Método de los Elementos Finitos, que permite investigar los factores que provocan compactación del suelo. Para cumplimentar este objetivo se determinaron las propiedades y parámetros constitutivos del modelo de Drucker Prager Extendido para representar las propiedades del suelo Rhodic Ferralsol. Se desarrolló y validó en condiciones experimentales un modelo en Método de los Elementos Finitos de un neumático 3, 5 x 10; el cual se utilizó para interaccionar con el suelo y formar el modelo de la simulación de la compactación, validándose este en condiciones de laboratorio. La aplicación del modelo permitió hacer recomendaciones para el diseño y administración de la maquinaria agrícola y constituye una base metodológica para la realización de investigaciones sobre el tema.

Palabras clave: compactación del suelo, método numérico, rueda, tráfico, transmisión de presiones.

Introducción

Las investigaciones sobre la compactación del suelo han estado dirigidas a evaluar el efecto de la humedad, la presión sobre el suelo, la carga sobre los sistemas de rodaje, la distribución de peso del vehículo y la

influencia de las tecnologías de labranza. Determinándose fundamentalmente mediante el registro de la resistencia a la penetración, la densidad de volumen, la porosidad total y otras variables (Domínguez, 1986 y 1987; Rodríguez, 1999; Rodríguez y González-Cueto, 2001; Herrera *et al.*, 2003; González-Cueto *et al.*, 2007). En los estudios realizados en condiciones de campo, no es posible evaluar todo el intervalo de valores de las diferentes variables que influyen en la respuesta del suelo al tráfico de la maquinaria agrícola, resulta difícil mantener en el tiempo y el espacio las condiciones establecidas de experimentación y se involucran gran cantidad de recursos materiales y humanos.

La modelación y simulación ofrecen la posibilidad de disminuir el tiempo, esfuerzos y cantidad de recursos para la investigación. La expansión de las capacidades computacionales y la necesidad de desarrollar soluciones a muy corto plazo para los problemas actuales de manejo agrícola y medioambiental han propiciado el desarrollo de la simulación en el área agrícola (López *et al.*, 2007).

La aplicación del método de los elementos finitos (MEF), para resolver problemas de modelación del suelo agrícola, es muy novedoso en Cuba, debido a que no es hasta el año 2006 que se introduce esta técnica. Herrera (2006) desarrolló aspectos metodológicos de aplicación general a problemas relacionados con la interacción herramienta de labranza-suelo. Dentro de los principales resultados de este trabajo

está la definición del modelo constitutivo de Drucker-Prager como adecuado para la modelación de la respuesta mecánica de los suelos Ferralíticos rojos compactados. Con respecto a la modelación de la compactación en Cuba, es con los trabajos de González-Cueto *et al.* (2009 y 2011) que se inicia la aplicación de estos métodos.

La simulación de la interacción neumático-suelo permite predecir la respuesta de este último en términos de distribución de presiones en el perfil y del cambio en la densidad de volumen u otras variables, ante el tráfico de maquinaria; permitiendo hacer recomendaciones a los agricultores con respecto a las tecnologías y equipamiento agrícola a emplear, las condiciones del suelo que reducen el riesgo de compactación, la profundidad hasta la que se produce esta, o a la que se encontrará la capa de arado; además, constituye un medio indispensable para los diseñadores y fabricantes predecir el comportamiento de sus equipos o prototipos respecto a su efecto sobre el suelo.

En el ámbito internacional se han desarrollado modelos de interacción neumático-suelo que cuando han estado dirigidos a investigar la compactación tienen como principal limitación que el neumático no se representa, solo se simula el efecto de una presión sobre un área del suelo con forma preestablecida, constituyendo una excesiva simplificación del problema, debido a que se desprecia la deformación del neumático y su influencia en la forma y dimensiones de la huella. Cuando han estado dirigidos a investigar diseño de neumáticos, traficabilidad o dinámica del vehículo se hace una representación del neumático que incluye todos los elementos de su estructura, demandando una alta capacidad computacional y ensayos especializados para la obtención de las propiedades del material.

Debido a las limitaciones de los modelos desarrollados para simular la compactación es necesario buscar nuevas vías de modelación que permitan representar la deformación del neumático y su influencia en la forma y dimensiones de la huella y que no demanden una alta capacidad computacional. Precisamente esta es la idea básica para desarrollar la modelación y simulación de la interacción neumático-suelo que enfrenta este trabajo, la cual se logra representando el neumático con un modelo del material elástico lineal y una sola capa con las propiedades promedio de este, que resuelve el problema de las limitaciones de los modelos anteriores. A partir de los elementos presentados anteriormente se fundamenta esta investigación, la cual presenta como objetivo: desarrollar un modelo, válido para la simulación

de la interacción neumático-suelo, mediante el MEF, que permita investigar factores que provocan compactación del suelo Ferralítico rojo compactado.

Materiales y métodos

Implementación del modelo en elementos finitos

Descripción del problema objeto de simulación. Representa el proceso de compactación del suelo provocada por el tránsito de un neumático 3, 5 x 10.

Modelo geométrico. El modelo geométrico del neumático comprendió un sólido tridimensional que en su conjunto representó las diferentes capas del neumático. Este incluyó las principales dimensiones y formas del neumático 3, 5 x 10; representándose la banda de rodadura como una superficie lisa, debido a que el neumático utilizado no es de tracción y sus estrías conforman casi una capa uniforme; además, de este modo se disminuye la demanda computacional. La Figura 1a, muestra el aspecto del neumático después de implementado en el software ABAQUS/CAE 6.8-1 y la Figura 1b el neumático original.

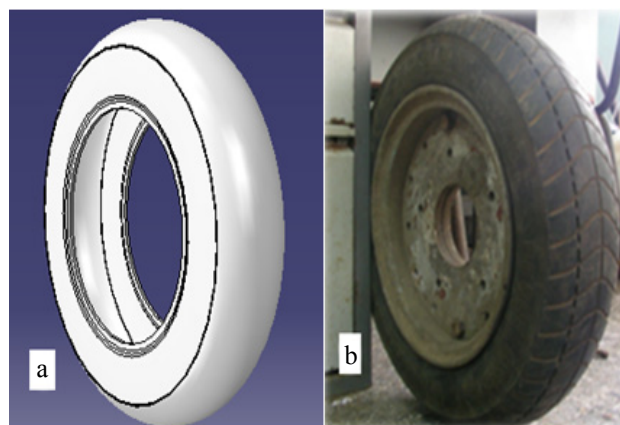


Figura 1. a) modelo del neumático representado en ABAQUS/CAE 6.8-1; y b) modelo original del neumático 3, 5 x 10.

El modelo geométrico del suelo es un sólido rectangular que representa la porción del canal donde se realizaron los ensayos. Para mejorar la eficiencia computacional se calibró el dominio geométrico variando las dimensiones del bloque en los tres ejes principales. Luego se seleccionaron las menores dimensiones en que las condiciones de bordes no influyen en los resultados.

Modelo del material. El neumático fue representado por un modelo elástico lineal. El coeficiente de Poisson (ν) se estableció con un valor de 0.48 y el módulo de elasticidad (E) se obtuvo mediante un procedimiento de análisis inverso. Para el suelo se empleó el modelo elastoplástico de Drucker Prager Extendido. Los parámetros constitutivos se determinaron a partir de ensayos de compresión triaxial y de cortante directo (Cuadro 1). Las propiedades del material corresponden a las de un bloque de suelo homogéneo e isotrópico dado que el suelo utilizado para la validación en condiciones de laboratorio tiene esta característica.

Cuadro 1. Parámetros constitutivos del suelo.

Propiedades	E (MPa)	ν	σ_f (MPa)	β°	K	Ψ°
Suelo seco	16	0.34	0.106	23	1	23
Suelo húmedo	1.2	0.24	0.055	9	1	0

Condiciones de cargas y bordes. Al neumático se le aplicaron en dos pasos; en el primero, se aplicó una presión uniforme en la superficie interior con valor igual a la presión de inflado del neumático y en el segundo, se aplicó una fuerza concentrada en el centro de la llanta con valor igual a la carga sobre el neumático. Al neumático se le asignó una restricción de acoplamiento cinemático, logrando que el centro de este simule una llanta (Figura 2a). En el punto central se asignó un punto de referencia (RP) que controla el desplazamiento de todo el neumático.

En este se restringieron los desplazamientos en **X** y **Y**, dejando libre el desplazamiento en **Z** de modo tal que el neumático se pueda comprimir contra el suelo, (Figura 2b). En el bloque de suelo se restringió el desplazamiento en los tres ejes de la superficie inferior, en el plano **XY** se restringió el desplazamiento en el eje **Z** y en el plano **YZ** se restringió el desplazamiento en el eje **X**. En el tercer paso, el que provoca movimiento y rotación del neumático al punto de referencia se le restringió el desplazamiento en **X**, se permitió el desplazamiento en **Y** y se impuso un desplazamiento en **Z**, dejando libre la rotación en **X** y limitando la rotación en **Y** y **Z**.

Tipo de elemento finito y densidad de malla. Para la discretización del neumático se utilizaron elementos híbridos, lineales, hexaédricos de ocho nodos (C3D8H), y para el suelo, elementos de integración reducida, lineales hexaédricos de ocho nodos (C3D8R).

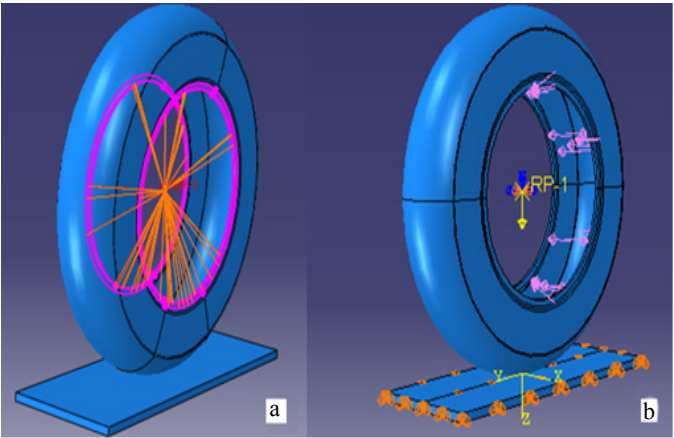


Figura 2. a) restricción de acoplamiento cinemático; y b) condiciones de cargas y bordes.

Metodologías empleadas para la determinación experimental, en condiciones de laboratorio, de la compactación del suelo

Las investigaciones experimentales se realizaron en el canal de suelos del, para lo cual se desarrollaron varios dispositivos y metodologías. El suelo centro de mecanización agropecuaria utilizado para la realización de los ensayos fue un Rhodic Ferralsol, tomado de las parcelas agrícolas de la Universidad Agraria de la Habana.

Metodología empleada para la preparación y acondicionamiento del canal de suelos

Partió de la selección de los dos valores de humedades a las que se realizaron los experimentos de tráfico. En el capítulo I se estableció que las operaciones agrícolas deben hacerse cuando el suelo tiene un contenido de humedad de 0.7-0.9 del límite plástico (LP); por lo tanto se seleccionó un valor de 0.8 LP; correspondiente a 25% de humedad; es decir, un suelo seco dentro del intervalo recomendado para la realización de las operaciones agrícolas. El otro valor seleccionado fue de 0.96 LP equivalente a 30% de humedad. La Figura 3 muestra los resultados de ensayos Proctor al suelo objeto de estudio, determinándose que el contenido de humedad óptima de compactación es 31%. En la figura se aprecia la posición de las dos humedades seleccionadas y como la densidad de volumen se incrementa con el aumento del contenido de humedad hasta alcanzar la humedad óptima de compactación, a partir de este valor no se obtienen aumentos de la densidad de volumen.

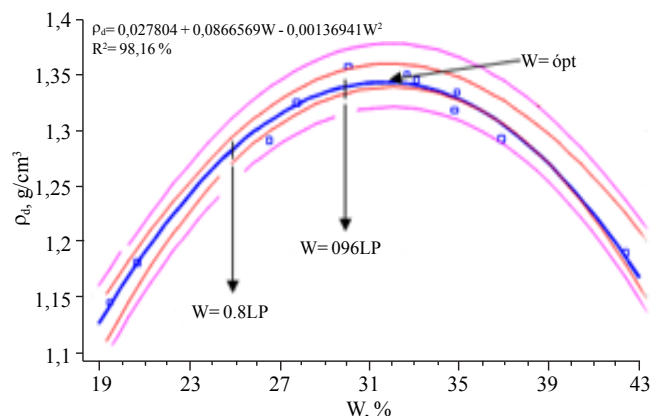


Figura 3. Curva de ensayo proctor al suelo Ferralítico rojo compactado ($W_{\text{ópt}}$: humedad óptima de compactación), adaptado de Herrera *et al.* (2006).

La Figura 4 muestra operaciones de acondicionamiento del canal de suelos para la realización de los experimentos. La longitud total del canal de suelos es de unos 8 m; este se dividió en dos zonas de cuatro metros cada una, la primera para el desplazamiento inicial y estabilización del neumático y la segunda para la realización de las mediciones. En esta última se depositó el suelo fuera del canal, quedando el espacio libre para la instalación de las cinco celdas de carga (dos a 0.25 m de profundidad y las otras tres a 0.1 m). Primero se colocaron los cinco soportes, dos de estos con las celdas de carga previamente acopladas (0.25 m de profundidad). Luego se depositó el suelo hasta cubrir la altura de todos los soportes y se compactó el área removida hasta obtener una densidad de volumen de 1 g cm^{-3} .



Figura 4. Proceso de preparación y acondicionamiento del canal de suelos para la realización de los experimentos en condiciones controladas.

Posteriormente se liberó el suelo encima de los otros tres soportes y se situaron sobre estos las tres celdas de carga restantes. Para finalizar se terminó de adicionar el suelo, se realizó la nivelación con un alisador acoplado al carro portaherramientas del canal y se procedió a compactar. Se tomaron muestras de suelo para determinar la densidad de volumen seca, a profundidades de 0 a 10, 10 a 20 y 20 a 30 cm al centro y en los bordes del canal, compactándose el suelo hasta el valor prefijado de densidad de volumen (1 g cm^{-3}). Para establecer las condiciones de humedad, dos semanas antes del experimento se humedeció el suelo y se dejó en reposo para que secara y alcanzara el equilibrio hídrico interno.

Durante este período de tiempo, frecuentemente, mientras el suelo se secaba se determinó la humedad, hasta obtener 25% de ésta. Luego de realizados los experimentos en la primera condición de suelo (25% de humedad) se retiraron las celdas de carga y los soportes, se procedió a descompactar nuevamente el suelo y se repitió todo el proceso. Posteriormente se aplicó agua al canal dejándolo en reposo durante una semana hasta alcanzar la humedad deseada (30%) y el equilibrio hídrico interno del suelo.

Dispositivo desarrollado para el tráfico del neumático 3, 5 x 10 en el canal de suelos. Al carro portaherramientas del canal de suelos se le adicionó un soporte para el neumático y las cargas (Figura 5). El número de vueltas del neumático y de las ruedas del carro portaherramientas se controlaron mediante un contador de vueltas conectado al sistema de adquisición de datos.

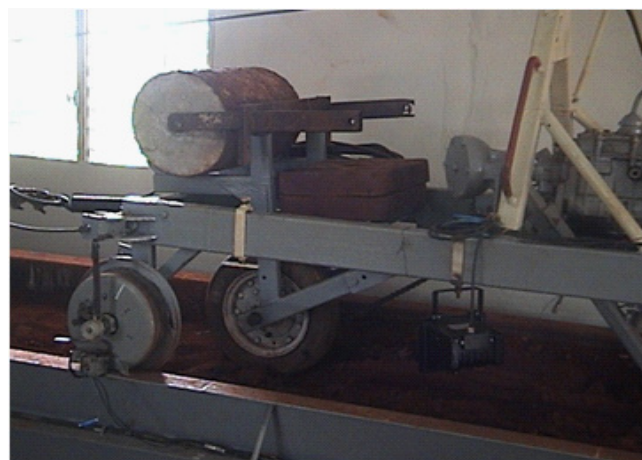


Figura 5. Carro portaherramientas y dispositivo desarrollado para el experimento de tráfico del neumático.

Metodología aplicada para la realización de los experimentos de tráfico. El Cuadro 2 muestra las diferentes cargas y presiones de inflado del neumático a las que se realizaron los experimentos de tráfico, cuatro en condiciones de suelo seco (25% de humedad y 1 g cm⁻³ de densidad de volumen) y cuatro en suelo húmedo (30% de humedad y 1 g cm⁻³ de densidad de volumen). El primer experimento de cada humedad se desarrolló con el suelo tal y como quedó después de preparado y los demás transitando el neumático sobre la huella de la corrida anterior.

Cuadro 2. Valores de presión de inflado y carga sobre el neumático a las que se realizaron las mediciones.

Humedad a 25%			Humedad a 30%		
Núm. ensayo	Pi (kPa)	C (N)	Núm. ensayo	Pi (kPa)	C (N)
I	100	712	V	100	712
II	325	712	VI	325	712
III	325	2 350	VII	325	2 350
IV	100	2 350	VIII	100	2 350

Se realizaron cuatro ensayos de tráfico para cada condición de humedad, en los que se determinaron la presión vertical sobre las celdas de carga y la deformación del perfil del suelo. Este último se obtuvo mediante la utilización de un soporte indicador situado en el extremo superior del canal de suelos. Con un pie de rey se midió la distancia desde el soporte hasta la huella dejada por la rueda en el suelo (Figura 6).

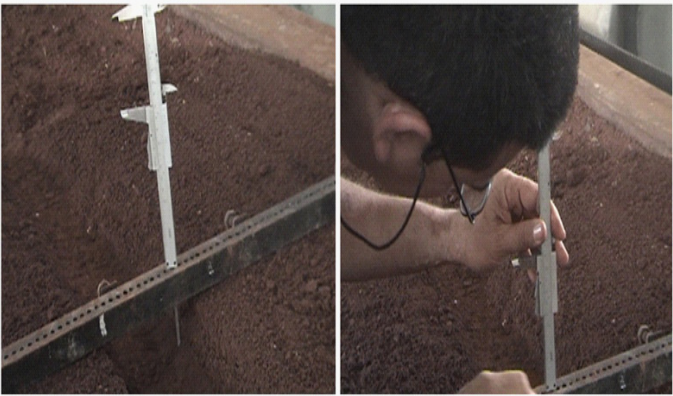


Figura 6. Determinación de la deformación en el perfil del suelo.

Resultados y discusión

La Figura 7 muestra los resultados de la presión en el contacto neumático-suelo para diferentes condiciones *Pi*-*C*, tanto en suelo seco como húmedo. En la Figura 7a se aprecia como a *Pi* de 100 kPa la presión en el contacto es máxima en los ejes del neumático e inferior en el centro. Este resultado se explica porque a bajas presiones de inflado la carcasa sostiene la mayor parte del peso sobre el neumático. A presión de inflado de 325 kPa y soportando el neumático la misma carga (712 N), este es más rígido y la *Pi* en su interior soporta mayor carga (Figura 7b), por lo tanto; la presión en el centro del contacto es mayor. Cuando al neumático con *Pi* de 100 kPa se le incrementa la carga hasta 2 350 N (Figura 7c), se observa como la diferencia entre la presión en el centro y en los ejes se hace más marcada, debido a que en este caso la carcasa transmite una mayor presión al suelo.

Las Figuras 7d y 7e muestran que en suelo húmedo la presión de inflado tiene poca influencia en la distribución de la presión en la superficie de contacto. En la Figura 7f se aprecia que el incremento de la carga a 2 350 N provoca el aumento de la presión en los ejes del neumático, lo cual manifiesta que en suelo húmedo, la carga sobre el neumático tiene mayor influencia que la *Pi*.

En los neumáticos agrícolas sometidos a baja presión de inflado la carcasa soporta la mayor parte de la carga total y la mayor presión se distribuye en los ejes del neumático cuando el suelo está seco. Para alta presión de inflado el incremento de la rigidez del neumático provoca que la presión se distribuya con mayores valores en el centro del neumático. En suelo húmedo la presión de inflado no influye en la distribución de presiones en la superficie de contacto, esta depende de la carga sobre el neumático.

Schjonning *et al.* (2008) determinaron experimentalmente la distribución de presiones en un neumático 650/65R30, 5 a 100 y 240 kPa de presión de inflado respectivamente. La Figura 8 permite comparar entre los resultados de las simulaciones realizadas en este trabajo y los registrados por Schjonning *et al.* (2008), demostrándose como la distribución de presiones predichas es muy similar a la experimental, en ambas *Pi*, lo cual señala la validez del modelo desarrollado.

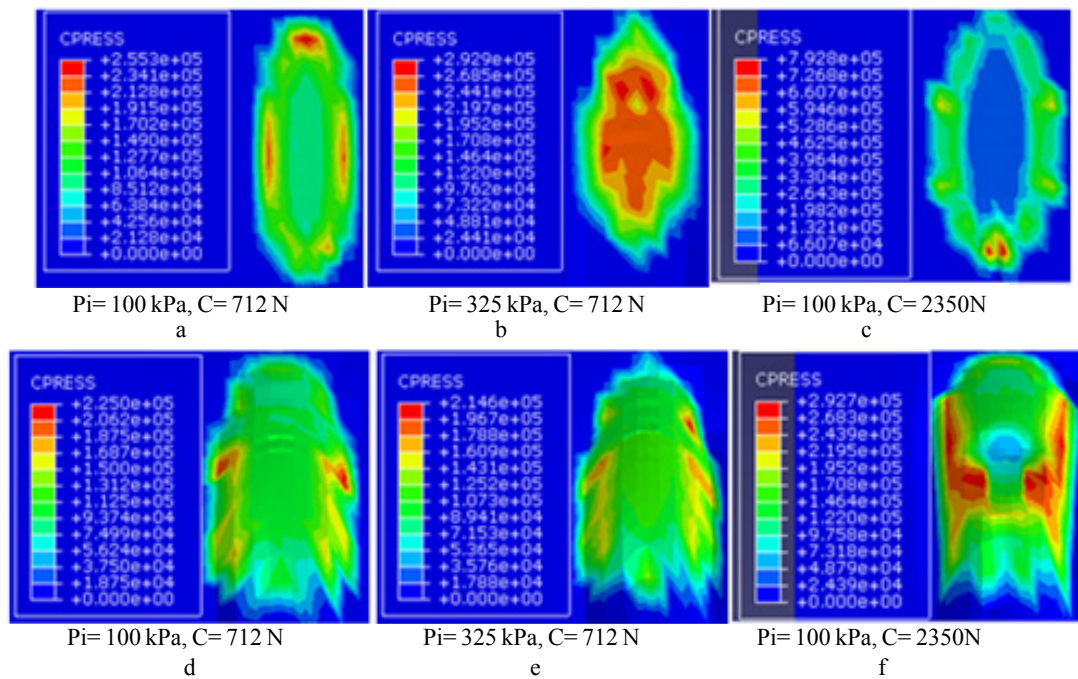


Figura 7. Presión en la superficie de contacto neumático suelo.

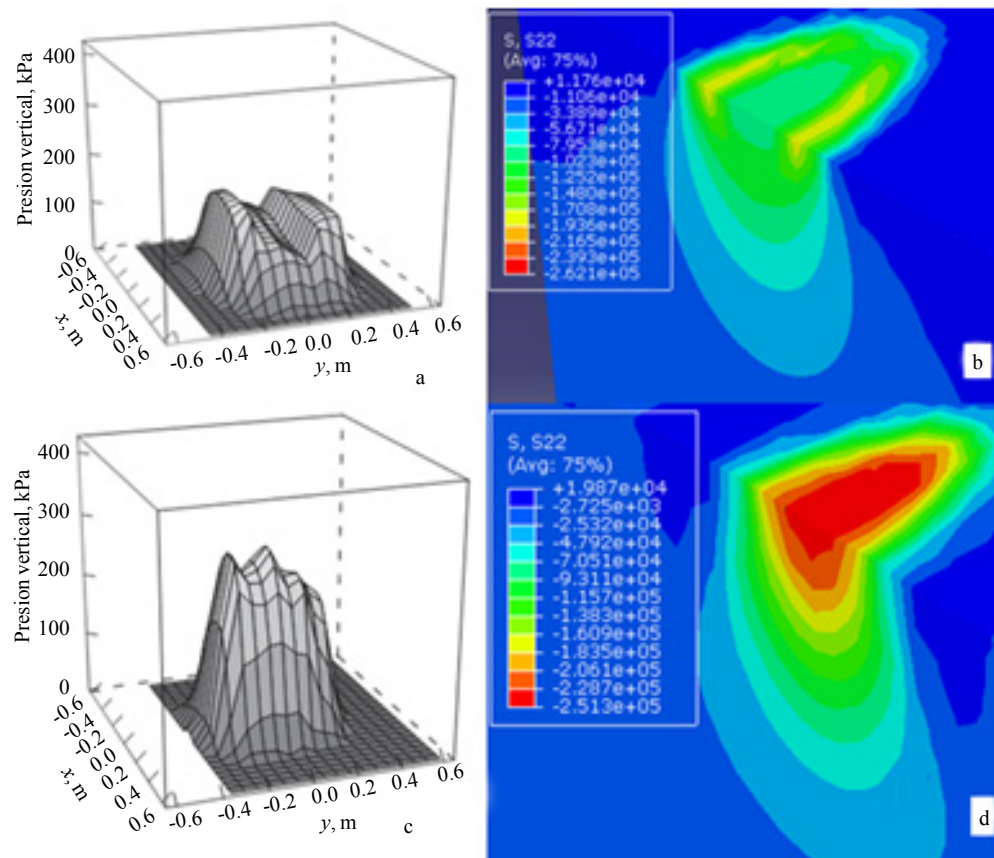


Figura 8. Distribución de presión vertical en la superficie del suelo bajo un neumático 650/65R30, 5. a) $P_i = 100$ kPa; c) $P_i = 240$ kPa) (Schjonning *et al.*, 2008). Simulaciones, presiones verticales en Pa; b) $P_i = 100$ kPa, d) $P_i = 325$ kPa).

Los resultados presentados aquí coinciden con los de otros autores respecto a la limitación que representa asumir la distribución de presiones en la superficie de contacto neumático-suelo como uniforme dado que esta depende de la presión de inflado, la carga sobre el neumático y las condiciones de suelo (van den Akker, 2004; Keller, 2005; Schjonning *et al.*, 2006; Keller *et al.*, 2007; Schjonning *et al.*, 2008).

Las Figuras 9 y 10 muestran, en sentido general, que existe ajuste entre predicciones y resultados experimentales, tanto para la presión vertical como para la deformación del suelo en el área de contacto.

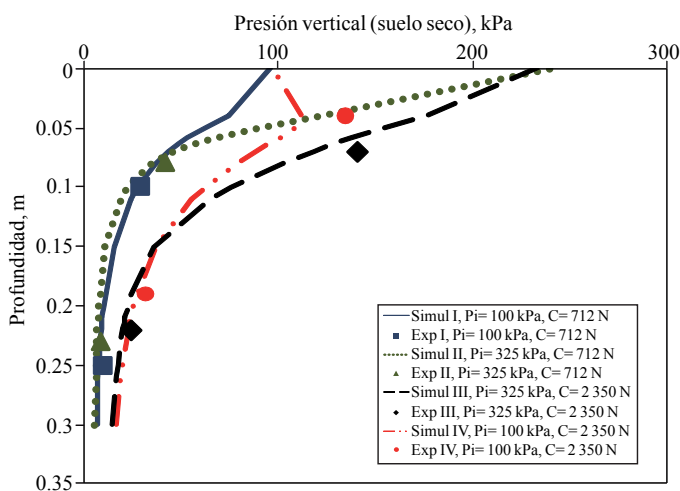


Figura 9. Presión vertical en suelo seco ($W=25\%$), experimental vs simulación.

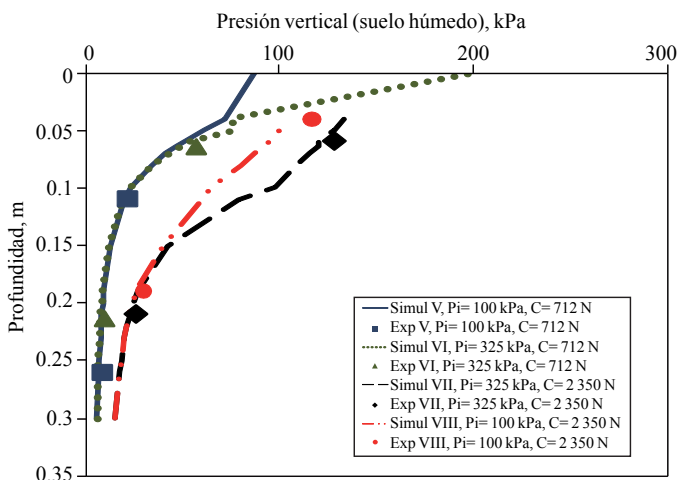


Figura 10. Presión vertical en suelo húmedo ($W=30\%$), experimental vs simulación.

Los valores de error absoluto medio de 15% para las presiones se consideran aceptables para el tipo de problema que se investiga; valores de error de hasta 20% han sido

alcanzados en modelos presentados por Mouazen *et al.* (1999); Rosa y Wulfsohn (1999); Herrera (2006). Éstos resultados permiten afirmar que los procedimientos implementados, así como, las propiedades y parámetros constitutivos adoptados son adecuados para la simulación de la compactación provocada por el tráfico de neumáticos de los vehículos agrícolas.

Conclusiones

El desarrollo de modelos, mediante el MEF, para la simulación del neumático y del suelo y la interacción de ambos, permitió obtener un modelo válido para la simulación de la interacción neumático-suelo.

Para las condiciones de suelo tanto húmedo como seco y neumáticos con presión sobre el suelo de 150 a 450 kPa y presiones de inflado de 100 a 325 kPa, la distribución de presiones en la superficie de contacto no es uniforme, la presión de inflado y la presión sobre el suelo influyen sólo en los primeros 15 cm de la capa superficial, a partir de esta profundidad las presiones verticales son resultado sólo de la carga sobre el eje.

Literatura citada

- Domínguez, M. 1986. Compactación del suelo húmedo por la acción negativa de los neumáticos de las cosechadoras de caña KTP-1, en condiciones estáticas. Rev. ATAC. (1):26-34.
- Domínguez, M. 1987. Compactación del suelo seco por el peso de las cosechadoras de caña KTP-1, en condiciones estáticas. Rev. ATAC (2):38-49.
- González-Cueto, O. 2011. Modelación de la compactación provocada por el tráfico de neumáticos, de los vehículos agrícolas, en suelos en condiciones de laboratorio, Tesis de Doctorado en Ciencias Técnicas Agropecuarias. Universidad Agraria de la Habana, Cuba. 149 p.
- González-Cueto, O.; Iglesias, C. E.; Herrera, M.; López, E. y Sánchez, A. 2007. Efecto del tránsito, durante el transporte de la caña de azúcar, en la resistencia a la compresión de un vertisol, *In*: Congreso Agromec. Ministerio de la Industria Sideromecánica, La Habana, Cuba.

- González-Cueto, O.; Iglesias, C. E.; Herrera, M.; López, E.; Sánchez, A.; Placeres, Y. y Betancur, E. 2009. Modelación de la compactación del suelo provocada por el fco de tractores de ruedas en suelos de la provincia de Villa Clara. Informe Final Proyecto CITMA Territorial 0140, CITMA. Villa Clara, Cuba. 70-75 p.
- Herrera, M.; Iglesias, C. E.; Rodríguez, M.; González-Cueto, O. y Madruga, R. 2003. Descompactación poscosecha de los vertisuelos mediante el empleo de escarificadores alados. *Rev. Cienc. Téc. Agropec.* 12(1):7-12.
- Herrera, M. 2006. Simulación del comportamiento mecánico de los suelos ferralíticos rojos mediante el método de elementos finitos. Tesis de Doctorado en Ciencias Técnicas Agropecuarias. Universidad Agraria de la Habana, Cuba. 173 p.
- Herrera, M.; Iglesias, C. E.; González-Cueto, O.; López, E.; Sánchez, A. y Delgado, R. 2006. Determinación de la humedad crítica de compactación de cuatro suelos agrícolas cubanos. *In: Congreso Agromec. Ministerio de la Industria Sideromecánica, La Habana, Cuba.* 80-92 p.
- 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(1):85-96.
- Keller, T.; Défossez, P.; Weisskopf, P.; Arvidsson, J. and Richard, G. 2007. Soil flex: 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(2):391-411.
- López, T.; González, F.; Cid, G.; Osorio, M. A. y Ruiz, M. E. 2007. Modelos de simulación: una herramienta actual indispensable en los estudios del continuo agua-suelo-planta-atmósfera. *In: Congreso Metánica 2007. Ministerio de la Industria Sideromecánica. La Habana, Cuba.*
- Mouazen, M. A. and Neményi, M. 1999. Finite element analysis of subsoiler cutting in nonhomogeneous sandy loam soil. *Soil Tillage Res.* 51:1-15.
- Rodríguez, M. 1999. Fundamentación de un sistema de rodajes por semiesteras en las cosechadoras cubanas de caña de azúcar para trabajar en suelos de mal drenaje con condiciones de elevada humedad. Tesis de Doctorado en Ciencias Técnicas, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba. 100 p.
- Rodríguez, M. y González-Cueto, O. 2001. Estudio de la compactación del suelo por la mecanización cosecha cañera en dos condiciones de humedad en los vertisuelos del norte de Villa Clara, *In: Convención Internacional Metánica, Ministerio de la Industria Sidero Mecánica. La Habana, Cuba.*
- Rosa, U. A. and Wulfsohn D. 1999. Constitutive model for high speed tillage using narrow tools. *J. Terramech.* (36):221-234.
- Schjonning, P.; Lamandé, M.; Tøgersen, F. A.; Arvidsson, J. and Keller, T. 2006. Distribution of vertical stress at the soil-tyre interface: effects of tyre inflation pressure and the impact on stress propagation in the soil profile. *In: International Soil Tillage Research Organisation, 17th Triennial Conference. Kiel, Alemania.* 1609-1614.
- Schjonning, P.; Lamandé, M.; Tøgersen, F. A.; Arvidsson, J. and Keller, T. 2008. Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil-tyre interface. *Biosystems Engineering.* 99(1):119-133.
- Van den Akker, J. J. H. 2004. Socomo: a soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity. *Soil Tillage Res.* (79):113-127.