

REVISIÓN

Análisis de investigaciones realizadas para modelar la compactación del suelo agrícola

Analysis of researches to model agricultural soil compaction

Omar González Cueto¹, Ciro E. Iglesias Coronel², Miguel Herrera Suárez³, Guillermo Urriolagoitia Sosa⁴
y Luis Héctor Hernández Gómez⁴.

RESUMEN. La compactación del suelo provocada por el tránsito de la maquinaria, es un problema que afecta las áreas de producción agrícola. Su modelación permite implementar estrategias de manejo del suelo y la maquinaria. Este trabajo tiene como objetivo analizar las principales características que presentan los métodos empleados para modelar la compactación del suelo. Los resultados muestran que el método más preciso para la modelación de la compactación del suelo es el Método de Elementos Finitos. Los modelos para la simulación de la compactación del suelo difieren de los desarrollados para simular el desempeño de neumáticos o del vehículo debido a que en la modelación del contacto, generalmente el neumático no se representa, sólo se simula el efecto de la presión sobre un área del suelo con forma preestablecida.

Palabras clave: tránsito, maquinaria, producción, manejo.

ABSTRACT. The soil compaction caused by the machinery traffic is a problem that affects the areas of crop production. The soil compaction modeling allows to implement strategies of soil and machinery management. The objective of this paper is to analyze the main characteristics of the methods used to model soil compaction. The results show that the most precise method for soil compaction modeling is the Finite Elements Method. The models for simulation of the soil compaction differ from those developed to simulate the performance of tires or the vehicle because in contact modeling, the tire is not generally simulated; and the effect of the pressure is only simulated on soil area with conditions established beforehand.

Keywords: traffic, machinery, production, management.

INTRODUCCIÓN

La modelación y simulación ofrecen la posibilidad de disminuir tiempo, esfuerzos y cantidad de recursos necesarios para tomar decisiones y recomendar estrategias de manejo en el ámbito agrícola. 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 búsqueda de vías para disminuir la degradación del suelo, han propiciado modelar la compactación del suelo provocada por el tráfico de máquinas agrícolas. La modelación de la compactación

permite predecir la respuesta del suelo en términos de distribución de presiones en el perfil y del cambio en la densidad de volumen u otras variables; Esto posibilita orientar a los agricultores sobre cuáles tecnologías y equipamiento agrícola deben emplear, las condiciones del suelo que reducen el riesgo de compactación y la profundidad a la cual una maquinaria o tecnología determinada provoca la compactación del suelo.

En la literatura científica internacional hay abundante información sobre el tema de la modelación de la compactación del suelo agrícola, sin embargo, está fragmentada y dispersa debido a los diferentes métodos empleados para la modelación. El objetivo de este trabajo es analizar, a partir de las diferentes fuente consultadas, las principales características

Recibido 27/09/09, aprobado 31/03/11, trabajo 30/11, revision.

¹ M Sc., Profesor Auxiliar, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Departamento de Mecanización Agropecuaria, E-✉: omar@uclv.edu.cu, Santa Clara, VC, Cuba.

² Dr C., Profesor e Investigador Titular, Universidad Agraria de La Habana, Centro de Mecanización Agropecuaria, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

³ Dr. C., Profesor Titular, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas Departamento de Mecanización Agropecuaria, Santa Clara, VC, Cuba.

⁴ Dr. C., Profesor e Investigador, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Zacatenco, México.

que presentan los métodos empleados para modelar la compactación del suelo.

DESARROLLO

Defossez y Richard (2002), refieren que la modelación de la compactación del suelo se ha basado en los métodos: analítico y numérico; criterio que han adoptado también Cui *et al.* (2006) y Keller *et al.* (2007). Sin embargo, estos autores no han tenido en cuenta los modelos logrados a través de los métodos empíricos, criterio que sí han considerado Mao y Han (2008). Estos últimos están fundamentados en parámetros que combinan características de los sistemas de rodaje y sus dimensiones, con las condiciones iniciales del suelo. Como variables de salida se obtienen la densidad de volumen, resistencia a la penetración, conductividad hidráulica, permeabilidad al aire o al agua, porosidad y otras. Algunos de los modelos fueron desarrollados por Bailey y Johnson (1989) y Lerink (1990). El hecho de estar basados sólo en relaciones empíricas implica que luego pueden ser aplicadas sólo en las mismas condiciones encontradas durante el experimento o necesitan de nuevas investigaciones experimentales para ser extendidas.

Las bases del modelo analítico fueron desarrolladas por Boussinesq (1885), quien estableció una solución para la propagación de los esfuerzos verticales originados por un punto con carga o área circular cargada. Posteriormente este modelo fue mejorado por Fröhlich (1934) y Söhne (1953), constituyendo la base de los modelos de van den Akker (2004) y Keller (2007), entre otros. Estos modelos presuponen que el suelo es un medio homogéneo, isotrópico y elástico; sin embargo, en el suelo no se cumplen estos supuestos dado que la deformación del suelo no es solo elástica, sino también y en mayor medida, plástica (Söhne, 1953). Defossez y Richard (2002) consideran que los métodos analíticos son apropiados para las condiciones del subsuelo, donde el material es más homogéneo, tiene mayor rigidez y por lo tanto ocurrirán menores deformaciones, lográndose mayor exactitud en las predicciones que en la capa superficial.

Liu y Wong (1996), consideran que, los modelos numéricos tienen un mayor potencial para obtener resultados más precisos durante la modelación de la compactación del suelo debido a: la introducción de un menor número de supuestos y simplificaciones; caracterizan el suelo como un medio continuo o discreto; usan directamente las condiciones límites en la superficie del suelo logrando mayor precisión en la modelación del área de la huella, presión sobre el suelo y forma del contacto neumático-suelo. Además, pueden considerar el efecto dinámico y calculan simultáneamente la relación esfuerzo-deformación para obtener la distribución de desplazamiento dentro del suelo (Defossez y Richard, 2002). Los modelos numéricos más empleados se fundamentan en los Métodos de Elementos Distintos o Discretos (MED) y de Elementos Finitos (MEF).

El MED es un método desarrollado por Cundall (1971), para el análisis de materiales granulares siendo posteriormente extendido a la mecánica de los sólidos para estudiar el proceso de falla de geomateriales y concreto (Wang y Tonon,

2009). Las formulaciones originales del MED fueron derivadas para materiales granulares y han sido aplicadas para analizar el comportamiento de suelos arenosos, extendiéndose posteriormente a suelos cohesivos. El MED ha sido utilizado con éxito para la modelación dinámica y mecánica de medios granulares (Figura 1), dentro de estos se ha aplicado a la interacción neumático-suelo (Nakashima, 2004; Nakashima y Oida, 2004; Khot *et al.*, 2007). Sin embargo, su aplicación a estudios de compactación del suelo ha sido escasa. La aplicación del MED tiene limitaciones referidas a la alta capacidad computacional, imprescindible para desarrollar los modelos, dado que las ecuaciones de movimiento de cada partícula dentro del sistema y sus interacciones con las vecinas son calculadas continuamente (Wang y Tonon, 2009). Además, los ensayos necesarios para determinar las propiedades de las partículas son costosos y aún no tienen una metodología establecida (Bharadwaj *et al.*, 2008). Otra limitación representa la ausencia de softwares comerciales disponibles para su empleo. Sin embargo, Cundall (2002), refiere que este es un método que tendrá un gran desarrollo dentro de los próximos 20 años, debiendo extenderse su aplicación a investigaciones sobre compactación del suelo.

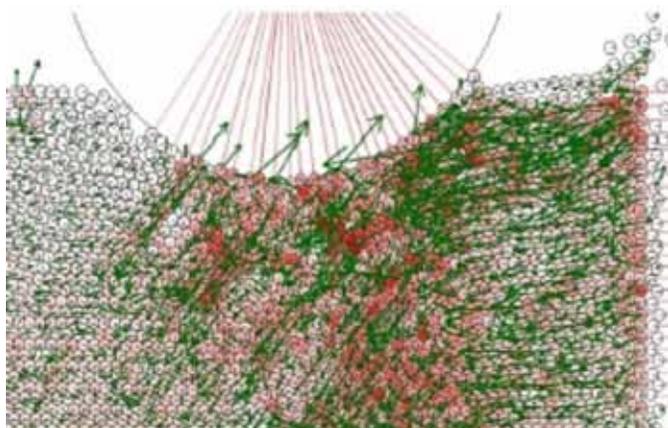


FIGURA 1. Deformación y dirección de las fuerzas en las partículas, para un desplazamiento de 0,04 m de una rueda rígida con una carga vertical de 14,7 N (Khot *et al.*, 2007).

Biris *et al.* (2009) consideran que el MEF es en la actualidad la técnica más apropiada para simular la compactación del suelo, siendo adecuado para el estudio de los fenómenos referidos a deformación, tracción y compactación. Cui *et al.* (2006) plantean que el MEF representa con mayor precisión el fenómeno físico real de la interacción neumático-suelo que los modelos empíricos o analíticos, lo cual ha propiciado su amplio empleo para la modelación de la compactación del suelo.

Los primeros trabajos de aplicación del MEF a los estudios de interacción neumático-suelo se hicieron a finales de la década del 60 y principios del 70 (Perumpral, 1969; Yong, y Fattah, 1976). Hasta la década de los noventa del pasado siglo, siguieron una tendencia en su desarrollo, con la aplicación de modelos elásticos no lineales y elastoplásticos. Estos modelos se caracterizaron por: problemas de deformación plana, o axial simétricos; no tuvieron en cuenta el efecto de grandes desplazamientos y no se representa la interacción neumático-

suelo, sólo se simula el efecto de una presión uniformemente distribuida sobre un área de contacto circular.

El avance de las capacidades computacionales y el desarrollo de los modelos constitutivos en los finales de la década de los 90 permitieron concentrarse en expresar con mayor exactitud la geometría; en incluir, además de la no linealidad material, la geométrica, logrando con ello un aumento en la precisión de las predicciones. Los modelos más avanzados se han caracterizado por representar el fenómeno como un problema tridimensional, donde la distribución de presiones, la formación de la huella y la interacción, son el resultado de las propiedades representadas por el neumático y el suelo, (Shoop, 2001; Mohsenimanesh *et al.*, 2009; Hambleton y Drescher, 2009).

En la modelación de la interacción neumático-suelo se diferencian los modelos realizados con el objetivo de resolver problemas de tracción, traficabilidad, dinámica, diseño del vehículo o del neumático, y los dirigidos a predecir la compactación del suelo. Cuando el propósito es el diseño de neumáticos se hace una representación muy detallada de este, se incluyen: la carcasa, compuesta de varios estratos de cuerdas flexibles (acero o nylon) incrustadas en compuestos de goma; alambres de acero y cables de rayón o nylon; y la banda de rodadura. Cada uno de estos materiales tiene propiedades diferentes, lo que hace al neumático estructuralmente complejo y heterogéneo (Figura 2). Estos modelos demandan una alta capacidad computacional, necesitan de técnicas especializadas para obtener los datos de entrada que expresan el comportamiento del neumático a partir de leyes constitutivas complejas como las hiperelásticas y viscoelásticas. Luego de desarrollado el modelo del neumático se valida; generalmente, comparando la deflexión, área de contacto u otras variables, con valores observados experimentalmente (Shoop, 2001).

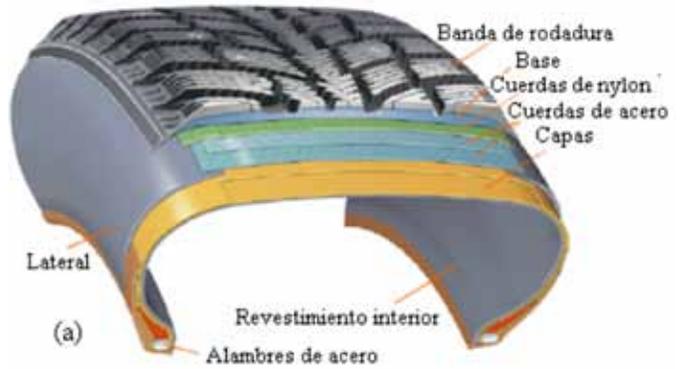


FIGURA 2. Representación del neumático, sección transversal (adaptado de Ojala, 2005).

La simplificación de las características físicas del neumático ha sido un método utilizado durante la modelación de la interacción neumático-suelo con el objetivo de facilitar el desempeño computacional (Nakashima y Wong, 1993; Shoop, 2001; Fervers, 2004). Estas simplificaciones pueden incluir la idealización del neumático con una sola capa y banda de rodadura lisa, la cual representa las propiedades generales de este (Nakashima y Wong, 1993; Hu y Abeels, 1994). Shoop (2001), representó un neumático tridimensional con dos variantes, una con banda de rodadura sin estrías y el otro con estrías, encontrando que las corridas del primer modelo fueron cuatro veces más rápidas que con el segundo y que en la mayoría de los casos, el ajuste de las predicciones a los datos experimentales del ejemplo con banda lisa fueron tan buenos o mejores que el modelo con estrías (Figura 3). Ghoreishy (2009) refiere que para estudios del comportamiento global del neumático un modelo con la banda de rodadura simple o con pocos detalles es suficiente, dado que se evita el alto costo computacional de modelos más complejos.

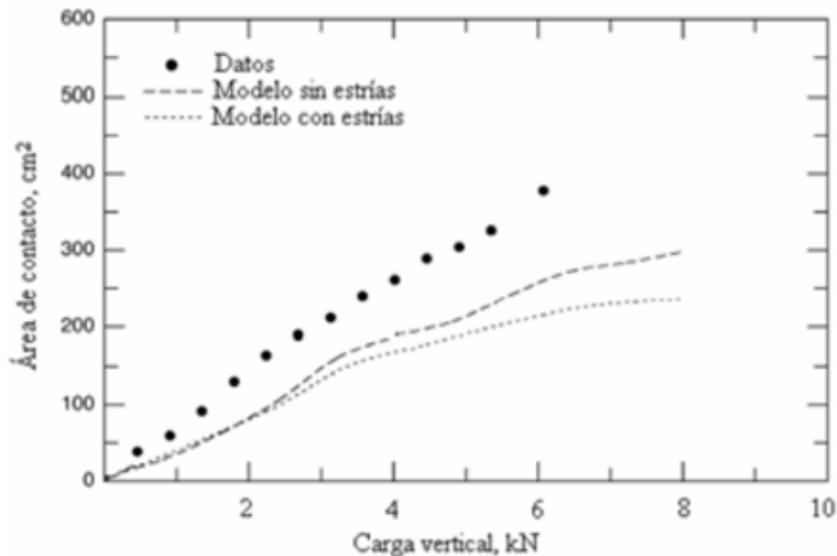


FIGURA 3. Característica carga-área de contacto de un neumático Wrangler AT, comparación con simulaciones en elementos finitos (Shoop, 2001)

En los modelos desarrollados con el objetivo de predecir la compactación, generalmente el neumático no se representa, sólo se simula el efecto de una presión sobre un área del suelo con forma preestablecida (Figura 4).

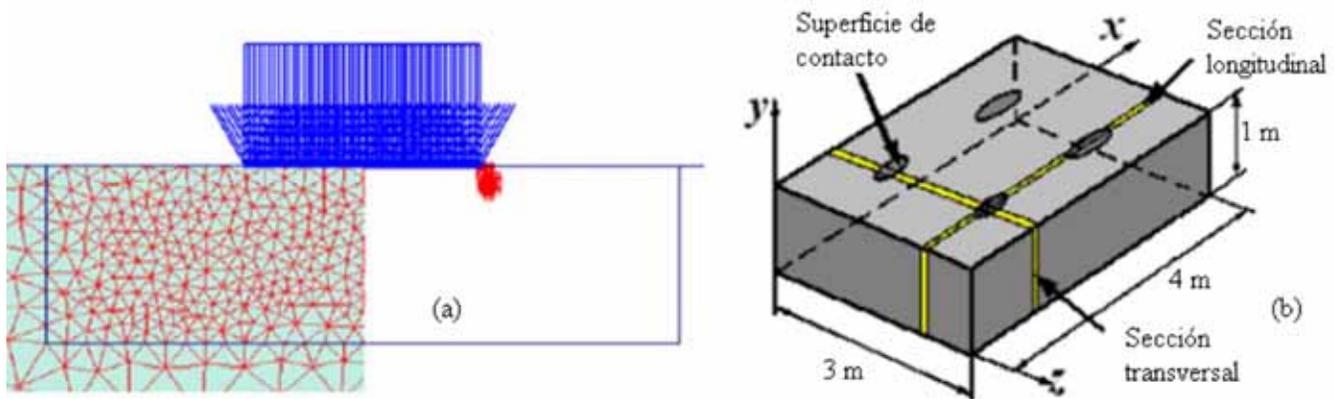


FIGURA 4. Representación del contacto neumático-suelo en investigaciones sobre compactación del suelo; a) Cui *et al.* (2007); b) Biris *et al.*, (2009).

Los modelos elásticos han sido utilizados para disminuir la demanda computacional, favorecer la convergencia, y ante dificultades en la obtención de los parámetros constitutivos del neumático (Nakashima y Wong, 1993; Hu y Abeels, 1994; Tonuk y Unlusoy, 2001; Ali *et al.*, 2007). Representando el neumático, en ocasiones, por una rueda rígida (Raper *et al.*, 1995; Liu y Wong, 1996; Chiroux, 2005). Las propiedades elásticas del neumático son descritas por el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson, los cuales caracterizan el comportamiento combinado de los elementos estructurales (Nakashima y Wong, 1993). Criterios ampliamente aceptados consideran el material de los neumáticos con bajo módulo de elasticidad, alta deformabilidad e incompresibles. Esta última característica permite asumir valores del coeficiente de Poisson cercanos a 0,5 (Nakashima y Wong, 1993; Hu y Abeels, 1994).

Al evaluar los métodos utilizados para la implementación de esta técnica encontramos que, en este momento, el MEF es el método más adecuado para su aplicación a la modelación de la compactación del suelo, debido a su precisión, grado de desarrollo y a la disponibilidad del equipamiento y metodologías necesarias para la obtención de los parámetros constitutivos y propiedades del suelo necesarias para su implementación. Para las condiciones de suelos cubanos nunca se han realizado investigaciones de la compactación mediante la modelación y simulación. Debido a la importancia que reviste el control y prevención de la compactación del suelo, para el desarrollo

agrícola, es necesario acometer acciones que permitan desarrollar un modelo en elementos finitos de la compactación del suelo agrícola.

CONCLUSIONES

- El método más preciso y de mayores posibilidades actualmente para la modelación de la compactación del suelo es el Método de Elementos Finitos.
- Los modelos para la simulación de la compactación del suelo difieren de los desarrollados para simular el desempeño de neumáticos o del vehículo, debido a que en la modelación del contacto, generalmente el neumático no se representa, sólo se simula el efecto de la presión sobre un área del suelo con forma preestablecida.
- La utilización de modelos constitutivos elásticos han sido utilizados con éxito en la modelación del neumático
- Los métodos analíticos, para la modelación de la compactación del suelo, son apropiados para las condiciones del subsuelo, donde el material es más homogéneo, tiene mayor rigidez y por lo tanto ocurrirán menores deformaciones, lográndose mayor exactitud en las predicciones que en la capa superficial.
- El Método de Elementos Discretos es el que más posibilidades de desarrollo futuro tiene, debiendo extenderse a la investigación de la compactación del suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- LÓPEZ, T.; F. GONZÁLEZ; G. CID; M.A. OSORIO y MARÍA E. RUÍZ: Modelos de simulación: una herramienta actual indispensable en los estudios del continuo agua-suelo-planta-atmósfera, En: **Congreso Metánica**, Ministerio de la Industria Sideromecánica, La Habana, Cuba, 2007.
- DEFOSSEZ, P. y G. RICHARD: "Models of soil compaction due to traffic and their evaluation", *Soil & Tillage Research*, 67: 41-64, 2002.
- CUI, K., P. DEFOSSEZ and G. RICHARD. A new approach for modeling a vertical stress distribution at the soil/tyre interface to predict compaction of cultivated soil with Plaxis model, En: **17 International Conference of ISTRO**, Kiev, 2006.
- KELLER, T. ; P. DEFOSSEZ ; P. WEISSKOPF ; J. ARVIDSSON y G. RICHARD : "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, 2007.
- MAO, SG. y RPS. HAN: "Nonlinear complementarily equations for modeling tire-soil interaction. An incremental Bekker approach", *Journal of Sound and Vibration*, 312: 380-398, 2008.
- BAILEY, AC. y CE. JOHNSON: "A soil compaction model for cylindrical stress states", *Transactions of ASAE.*, 32: 822-825, 1989.
- LERINK, P: "Prediction of the immediate effects of traffic on field soil qualities", *Soil & Tillage Research*, 16: 153-166, 1990.

- BOUSSINESQ, J.: *Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastique*, Gauthier-Villais, Paris, Francia, 1885.
- FRÖHLICH, OK. *Druckverteilung im baugrunde*, Verlag von Julius Springer, Wien, Austria, 1934.
- SÖHNE, W.: "Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schleppeireifen", *Grundl.Landtech.*, 5: 49-63, 1953.
- VAN DEN AKKER, J.J.H. "SOCOMO: "A soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity", *Soil & Tillage Research*, 79: 113-127, 2004.
- LIU, C.H. and J.Y. WONG: "Numerical simulations of tire-soil interaction based on critical soil mechanics", *Journal of Terramechanics*, 33(5): 209-221, 1996.
- CUNDALL, P.A.: A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems, In: **Symposium Soc. Internat Mécanique des Roches**, pp. 2-8, Nancy, France, 1971.
- WANG, Y. and F. TONON. *Calibration of a discrete element model for intact rock up to its peak strength*", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, [en línea] 1997, Disponible en: www.interscience.wiley.com*, Wiley InterScience, DOI: 10.1002/nag.811, 2009 [Consulta: agosto 2009].
- NAKASHIMA, H. and A. OIDA: Simulation of soil-tire interaction by a coupled Distinct Element-Finite Element Method. En: **6th APISTVS Conference**, pp 559-563, Bangkok, 2001.
- NAKASHIMA, H. Discrete Element Method (DEM) and its possible application, In: **SICE Annual Conference in Sapporo**, Hokkaido Institute of Technology, 2004.
- KHOT, LR, VM. SALOKHE, H. JAYASURIYA and H. NAKASHIMA. "Experimental validation of distinct element simulation for dynamic wheel-soil interaction", *Journal of Terramechanics*, (44): 429-437, 2007.
- BHARADWAJ, R., J. KHAMBekar, A. ORLANDO, Z. GAO, H. SHEN, B. HELENBROOK, TA. ROYAL y P. WEITZMAN. A comparison of discrete element modeling, finite element analysis, and pPhysical experiment of granular material systems in a direct shear cell, In: **Space Technology and Applications International Forum**, Ed: by M. S. El-Genk, American Institute of PHysics, USA, 2008.
- CUNDALL, P.A.: A discontinuous future for numerical modeling in soil and rock, En: **Discrete Element Methods-Numerical Modeling of Discontinue**, pp. 3-4, Ed. by Cook BK, Jensen RP, ASCE, 2002..
- BIRIS, S.S.; V. VLADUT; N. UNGUREANU; G. PARASCHIV and G. VOICU: "Development and experimental testing of a FEM model for the stress distribution analysis in agricultural soil due to artificial compaction", *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 74 (1): 21-29, 2009.
- PERUMPRAL, J.V. *The finite element method for predicting the stress distribution and soil deformation under tractive device*, **Tesis (en opción del grado científico de PH D)**, Purdue University, Lafayette, 1969.
- YONG, RN. y EA. FATTAH. "Prediction of wheel-soil interaction and performance using finite element method", *Journal of Terramechanics*, 13(4): 227-240, 1976.
- SHOOP, A.S. *Finite element modeling of tire terrain interaction*, US. Army Corps of Engineers, ERDC/CRREL TR 01-16, 2001.
- MOHSENIMANESH, A.; SM. WARD and MD. GILCHRIST: "Stress analysis of a multi-laminated tractor tyre using non-linear 3D finite element analysis", *Materials and Design*, (30): 1124-1132, 2009.
- HAMBLETON, A. and A. DRESCHER. "On modeling a rolling wheel in the presence of plastic deformation as a three or two dimensional process", *International Journal of Mechanical Sciences*, 51(11-12): 846-855, 2009.
- FERVERS, CW.: "Improved FEM simulation model for tire-soil interaction", *Journal of Terramechanics*, 41: 87-100, 2004.
- OJALA, J.K.: *Using ABAQUS in tire development process. [en línea] 2005, Disponible en: http://www.simulia.com/download/solutions/automotive_cust%20references/tires_development_auc05_nokian.pdf*, [consulta octubre de 2009].
- NAKASHIMA, H. and J.Y. WONG: "A three-dimensional tire model by the finite element method", *Journal of Terramechanics*, 30(1): 21-34, 1993.
- HU, YK. And PFJ. ABEELS: "Agricultural tire deformation in the 2D case by finite element method", *Journal of Terramechanics*, (31): 353-370, 1994.
- GHOZEISHY, MHR. "Finite element modelling of the steady rolling of a radial tyre with detailed tread pattern", *Iranian Polymer Journal*, 18 (8): 641-650, 2009.
- CUI, K., P. DÉFOSSSEZ and G. RICHARD: "A new approach for modeling 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, 2007.
- TONUK, E. y YS. UNLUSOY. "Prediction of automobile tyre cornering force characteristics by finite element modeling and analysis", *Computers and Structures*, (79): 1219-1232, 2001.
- ALI, R., A. NATAATMADJA y P. GUDIMETLA. Behaviour of tyre reinforced unsealed pavement, In: **10th Australia New Zealand Conference on Geomechanics**, (1): 418-423, Brisbane, 2007.
- RAPER, R.L., CE. JOHNSON, AC. BAILEY, EC. BURT y WE. BLOCK. "Prediction of soil stresses beneath a rigid wheel", *Journal of Agricultural Engineering Research*, (61): 57-62, 1995.
- CHIROUX, RC.;W.A. FOSTER; C.E. JOHNSON, SA. SHOOP and R.L. RAPER: "Three-dimensional finite element analysis of soil interaction with a rigid wheel", *Applied Mathematics and Computation*, (162): 707-722, 2005.