

**UCLV**  
Universidad Central  
"Marta Abreu" de Las Villas



**FCA**  
Facultad de  
Ciencias Agropecuarias

Departamento de Ingeniería Agrícola

## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**Título del trabajo:** Predicción de la compactación del suelo y demanda de tracción de equipamiento de transporte de la cosecha de caña de azúcar en condiciones de elevada humedad.

**Autor del trabajo:** Angel Leonardo Bermúdez Chaviano

**Tutores del trabajo:** Dr. C. Omar González Cueto.

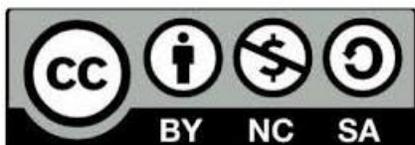
Dr. C. Yoel Betancourt Rodríguez.

Santa Clara, Junio del 2018  
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

**Atribución- No Comercial- Compartir Igual**



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419



*“El futuro de Cuba tiene que ser necesariamente un futuro de  
hombres de ciencia”*

*Fidel Castro Ruz*

*A mi familia y profesores por su dedicación y empeño en mi  
formación.*

## Resumen

Se realizó una investigación con el objetivo de predecir el efecto sobre el suelo provocado por el tráfico y las cualidades de tracción de equipamiento para el transporte de la caña de azúcar en alta humedad. El trabajo se realizó en la Unidad de Base de Producción en Cooperativa Chiqui Gómez de la Unidad Empresarial de Base José María Pérez, pertenecientes a la Empresa Azucarera Villa Clara. La simulación del efecto del tráfico de las maquinarias y del equipamiento agrícola sobre el suelo se ejecutó con el programa TASC V3.0. Los principales resultados indicaron que los tractores YTO 1604 y el XTZ 150K 09 realizaron presiones sobre el suelo superiores a los 20 cm de profundidad en ambos puentes, tuvieron un desempeño de tracción similar de 24,17 kN y 24,35 kN, respectivamente al igual que el coeficiente de resistencia a la rodadura (0,16). Las máximas eficiencias de tracción del tractor YTO 1604 y del XTZ 150K-09 fueron de 56% y de 53% respectivamente, para un patinaje en ambos caso entre 14 y 18%. El remolque autobasculante demandó una fuerza de tracción de 45,98 kN a máxima capacidad la cual no es satisfecha por ninguno de los dos tractores utilizados. Se recomendó realizar otras investigaciones de simulación al 75 y al 50% de la carga del remolque autobasculante en las mismas condiciones de investigación y evaluar la utilización de otros neumáticos de mayor flotabilidad en el tractor YTO 1604.

## **Abstract**

An investigation was carried out with the objective of predicting the effect on the soil caused by traffic and the tractive qualities of equipment for sugar cane transport in high moisture condition. The work was carried out at the UBPC Chiqui Gómez of the UEB José María Pérez, belonging to Sugar Company Villa Clara. The simulation of the effect of machinery traffic of the agricultural equipment on the ground was executed with the program TASC V3.0. The main results indicated that the tractors YTO 1604 and the XTZ 150K 09 made pressures on the ground superior to 20 cm of depth in both axles, they had a similar traction performance of 24,17 kN and 24,35 kN, respectively, as did the coefficient of rolling resistance (0,16). The maximum traction efficiencies of the YTO 1604 and XTZ 150K-09 tractors were 56% and 53% respectively, for skating in both cases between 14 and 18%. The self-tipping trailer demanded a pulling force of 45,98 kN at maximum capacity which is not satisfied by any of the two tractors used. It was recommended to carry out other simulation research at 75% and 50% of the load of the self-tipping trailer under the same research conditions and to evaluate the use of other tires with greater flotation in the YTO 1604 tractor.

# Índice

<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1. Revisión Bibliográfica .....</b>	<b>8</b>
1.1 Importancia de la caña de azúcar y particularidades para su cultivo. ....	8
1.2 La cosecha de caña de azúcar en condiciones de elevada humedad. ....	9
1.3 Modelos para la predicción de la compactación del suelo. ....	11
1.4 Simulación de la predicción de tracción.....	14
1.5 Análisis de las investigaciones realizadas sobre el tema objeto de estudio. ....	15
<b>Capítulo 2. Materiales y Métodos .....</b>	<b>19</b>
2.1 Metodología para simular el efecto sobre el suelo del tráfico, del equipamiento para el transporte de la caña de azúcar en condiciones de elevada humedad .....	19
2.2 Metodología para simular la demanda de tracción del remolque autobasculante y las cualidades de tracción de los tractores utilizados en la cosecha en alta humedad. ....	24
<b>Capítulo 3. Resultados y discusión .....</b>	<b>29</b>
3.1. Resultados de la simulación del efecto sobre el suelo del tráfico, del equipamiento para el transporte de la caña de azúcar en condiciones de elevada humedad. ....	29
3.2. Resultados de la simulación de la demanda de tracción del remolque autobasculante y las cualidades de tracción de los tractores utilizados en la cosecha en alta humedad. ....	32
<b>Conclusiones .....</b>	<b>39</b>
<b>Recomendaciones.....</b>	<b>40</b>
<b>Referencias Bibliográficas. ....</b>	<b>41</b>

# **INTRODUCCIÓN**

## **Introducción**

La producción mundial de caña de azúcar es de casi 1 700 066 751 toneladas con un área de cosecha de aproximadamente 24 000 000 ha, el rendimiento promedio de la caña de azúcar en el mundo es cercano a las 60 t/ha, algunos países tiene una producción promedio de 100 t/ha o más. Durante los años del segundo decenio de este siglo la producción de caña de azúcar se ha mantenido en un nivel más o menos similar.

La producción de azúcar de caña en Cuba es de vital importancia para la economía del país, dedicándose en los últimos años grandes cantidades de hectáreas de suelo a este cultivo, en 2013-2014 se cultivó en 450 200 ha obteniéndose una producción de 17 600 000 t. En suelos con problemas de mal drenaje existen alrededor de 257 700 ha. En esas condiciones se encuentra una parte con características edafoclimáticas específicas, muy susceptibles al sobre-humedecimiento creado por los períodos lluviosos, que requieren en la atención fitotécnica de la caña, particularmente en la cosecha cañera, un manejo diferenciado. A las áreas con estas características se le ha denominado condiciones de alta humedad (Betancourt *et al.*, 2015).

Cuando el suelo presenta elevadas condiciones de humedad se pone flácido o pierde parte de su resistencia mecánica o su capacidad de soportar los esfuerzos normales y tangenciales del sistema de rodaje de los equipos que lo transitan. Esto conlleva, que cuando existe un alto nivel de mecanización de las labores agrícolas habrá afectaciones por la incapacidad de trabajar en estas condiciones, tal es el caso de la cosecha de la caña en condiciones de alta humedad.

En Cuba la humedad del suelo es una variable clave en muchas investigaciones agrícolas, hidrológicas y meteorológicas. Las cuales están dirigidas a evaluar la presión sobre el suelo, la carga sobre el sistema de rodaje, la distribución de peso del vehículo y las influencias de las tecnologías de labranza.

La compactación en los suelos agrícola es un problema que conlleva a la utilización de energías en las labores, alto consumo de recurso y la degradación

del suelo haciendo que se pierdan sus propiedades y así mismo obteniéndose bajas tasas de rendimiento en la producción. La compactación causa cambios en las propiedades físicas del suelo (Demuner *et al.*, 2013.).

La compactación del suelo es, básicamente, un proceso acumulativo de aumento de la densidad aparente y de la resistencia a la penetración, por una reducción de la macroporosidad, que causa efectos negativos sobre el desarrollo radicular, disminución de la actividad biológica e insuficiente aporte de oxígeno por mala ventilación del suelo, la tasa de infiltración se disminuye y los campos se erosionan o permanecen largos tiempos inundados (Gonzalez *et al.*, 2004b)

En la costa norte de la provincia de Villa Clara predominan los suelos vertisol, los que han sido durante mucho tiempo intensamente labrado y se encuentran degradados física y químicamente. Por lo que presentan problemas de degradación estructural, por el uso continuo de de la mecanización en las cosecha de caña de azúcar.

En informes elaborados sobre esta problemática de la mecanización de la cosecha en el norte de la provincia señala que: se realizan zafra cortas que en muchos casos no logran procesar toda la caña disponible, incumpliendo los planes de producción previstos. La caña que queda en los campo por cosechar es poco apropiada para esos fines, lo que repercute negativamente en la producción azucarera de la siguiente zafra.

La tardía cosecha de los retoños y la primavera obligan a cortar la zafra siguiente cepas con menor edad, a las cuales también se le afectó la realización de todas las atenciones culturales que necesitaba reduciendo el potencial de disponibilidad de caña. Se incumple el programa de cosecha en el período óptimo de rendimiento industrial de la caña en azúcar. La inestabilidad de las molidas crea serios problemas a la eficiencia del proceso industrial de obtención de azúcar.

Se subutilizan las capacidades industriales y de medios de cosecha instalados, así como los recursos materiales y humanos disponible para la zafra. Se encarece la zafra por el nivel de gastos con que se realiza la misma y una menor producción

de azúcar. No existe correspondencia en los resultados productivos y las inversiones realizadas para aumentar la producción azucarera en estas zonas.

La mayoría de las máquinas cosechadoras cañeras y medio de transporte utilizados en Cuba tienen neumáticos en su sistema de rodaje, pesan entre 10-18 t. En la actualidad, en los campos cañeros cubanos funcionan cosechadoras modernas altamente promisorias no solo para nuestro país, sino para varios países de la región como la de la marca CASE series A8000 con un alto grado de automatización y con excelentes características técnico - explotativas.

En sentido general, los semirremolques autobasculante se construyen con neumáticos de alta flotación para minimizar la compactación del suelo y con diferentes capacidades de carga, siendo los más comunes aquellos que pueden cargar de 8 a 12 toneladas.

Para la solución de estos problemas, el grupo empresarial AZCUBA ha introducido un sistema de máquinas que permite a la cosechadora trabajar en condiciones de elevada humedad, sin embargo, los tractores y los remolques autobasculante introducidos para el transporte intermedio de la caña de azúcar no han sido los idóneos, provocando grandes daños al suelo durante el tráfico. Este daño causa compactación, la cual persiste con los años y causa afectaciones a los retoños de la caña de azúcar.

El uso intensivo de maquinarias tiene efectos negativos sobre las propiedades físicas del suelo. Cuando la cosecha se realiza en condiciones húmedas, el suelo puede presentar contenidos de humedad cercanos a la saturación disminuyendo la capacidad portante del suelo, lo que provoca el enterramiento de los tractores y vagones, la compactación del suelo y daños directo sobre la cepa de la caña (Cuellar; Santos, 2010).

La mecanización de la cosecha afecta la producción, el desarrollo del cultivo, las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos. Se señala que el crecimiento de las raíces lo determinan cuatro factores fundamentales: resistencia mecánica, disponibilidad de agua, oxígeno, energía, precisando que las

propiedades asociadas son la resistencia a la penetración, el potencial de agua, la aireación al igual que la temperatura, respectivamente (García *et al.*, 2010).

Los efectos que provoca la cosecha de la caña en condiciones de alta humedad, se puede señalar que, por las características de los equipos que participan en las operaciones de cosecha, existen mayores posibilidades de afectar los cañaverales, aumentando los problemas de compactación, los riesgos de daño a la cepa y la probabilidad de una menor longevidad del cañaveral.

En las investigaciones realizadas en condiciones de campo, no es posible evaluar todo el intervalo de las diferentes variables que influyen en la respuesta del suelo al tráfico de las máquinas agrícolas, resulta difícil mantener en el tiempo y espacio las condiciones establecidas de experimentación y se involucran gran cantidad de recurso material y humano.

La modelación y la simulación ofrecen la posibilidad de disminuir el tiempo, esfuerzo 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 medioambientales han proporcionado el desarrollo de la simulación en el área agrícola (Lopez *et al.*, 2007a).

Por lo tanto sería muy provechoso simular el tráfico de los remolques autobasculantes y los tractores durante el transporte de la caña de azúcar en alta humedad. Estas investigaciones se han realizado fundamentalmente mediante métodos numéricos, tales como, el Método de Elementos Finitos (MEF) o mediante Métodos Analíticos.

El MEF calcula soluciones numéricas concretas y adaptadas a unos datos particulares de entrada, no puede hacerse un análisis de sensibilidad sencillo que permita conocer cómo variará la solución si alguno de los parámetros se altera ligeramente. Es decir, proporciona sólo respuestas numéricas cuantitativas concretas, no relaciones cualitativas generales. El MEF proporciona una solución aproximada cuyo margen de error en general es desconocido.

Si bien algunos tipos de problemas permiten acotar el error de la solución, debido a los diversos tipos de aproximaciones que usa el método, los problemas no lineales o dependientes del tiempo en general no permiten conocer el error. En el MEF la mayoría de aplicaciones prácticas requiere mucho tiempo para ajustar detalles de la geometría, existiendo frecuentemente problemas de mal condicionamiento de las mallas, desigual grado de convergencia de la solución aproximada hacia la solución exacta en diferentes puntos, etc. En general, una simulación requiere el uso de numerosas pruebas y ensayos con las geometrías simplificadas o casos menos generales que el que finalmente pretende simularse, antes de empezar a lograr resultados.

El método analítico ha sido ampliamente utilizado para modelar el tráfico de vehículos sobre el suelo, varios modelos han sido desarrollados que pueden ser utilizados para la simulación. El amplio uso de estos modelos se debe a la facilidad de obtención de los datos necesarios para su empleo y a la buena precisión en el resultado.

Dado que se hace necesario evaluar el efecto sobre el suelo de los medios de transporte de la caña de azúcar en condiciones de elevada humedad se fundamenta esta investigación que tiene como:

Problema científico: ¿Cuál será el efecto sobre el suelo y las cualidades de tracción en condiciones de elevada humedad de equipos para el transporte intermedio de la caña de azúcar?

Hipótesis: Si se simula el tráfico y los indicadores de tracción de equipamiento para el transporte de la caña de azúcar en condiciones de elevada humedad del suelo se podría predecir el efecto sobre el suelo y las cualidades de tracción de los equipos.

Objetivo general: predecir el efecto sobre el suelo provocado por el tráfico y las cualidades de tracción de equipamiento para el transporte de la caña de azúcar en alta humedad.

Objetivos específicos:

1. Simular el efecto del tráfico sobre el suelo del equipamiento para el transporte de la caña de azúcar en condiciones de elevada humedad.
2. Simular la demanda de tracción del remolque autobasculante y las cualidades de tracción de los tractores utilizados en la cosecha en alta humedad.

# **REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

## Capítulo 1. Revisión Bibliográfica

### 1.1 Importancia de la caña de azúcar y particularidades para su cultivo.

La caña de azúcar, es una antigua fuente de energía para los seres humanos, fue empleada por primera vez en el Sudeste Asiático y en la India Occidental como reemplazo del combustible fósil para vehículos a motor. Es un recurso natural renovable, constituye una fuente de azúcar, biocombustible, fibra, fertilizante y muchos otros productos y subproducto con sustentabilidad ecológica. El jugo de la caña de azúcar es utilizado en la producción de azúcar. Los principales subproductos de la industria azucarera son el bagazo y las melazas (Rodriguez, 2011).

Según Franco *et al.* (2009) la caña de azúcar es un cultivo poco exigente en cuanto al suelo, tolera bien y se ha cultivado económicamente tanto en suelos muy pesados o arcillosos, como en muy ligeros o arenosos. Sus exigencias respecto al suelo se limitan a profundidad, la necesaria para desarrollar su sistema radicular, alrededor de un metro, aireación suficiente, pH, valores que no se alejen demasiado de la neutralidad, aunque suele tolerar desde 4 hasta 10, salinidad y/o alcalinidad, no muy elevada, aun cuando hay diferencias bastantes marcadas entre variedades.

Aunque la caña de azúcar es un cultivo conservador, las áreas destinadas para ella también necesitan de la protección del suelo, para mantener su fertilidad y conservar la humedad, especialmente en zonas onduladas. No obstante cuando se cultiva en estos tipos de suelos, se necesita medidas tradicionales de conservación, si las cuales se deterioran con rapidez (Vasquez, 2003).

Entre los suelos destinados a la producción de caña de azúcar ocupan un lugar destacado los vertisoles, los cuales, en Cuba, representan el 37% del área. Estos suelos poseen condiciones físicas excelentes para el desarrollo de la plantación, sin embargo, su característico mal drenaje puede afectar su productividad agrícola y provocar la interrupción de la zafra cuando se producen intensas lluvias durante días, semanas y en ocasiones, hasta meses (Gonzalez; Herrera, 2005).

## 1.2 La cosecha de caña de azúcar en condiciones de elevada humedad.

En el norte de Villa Clara predominan los suelos Hidromórficos que están ampliamente extendidos, los que han sido durante mucho tiempo intensamente laborados y se encuentran degradados física y químicamente. Por lo que presentan problemas de degradación estructural, acidificación por el uso inadecuado de fertilizantes, salinización y compactación por el uso continuo de la mecanización en la cosecha de la caña de azúcar (Rodríguez, 2010).

Según Rodríguez (1999) existe una estrecha relación entre la humedad y la compactación que tiene el suelo en el momento del tráfico. Sucede que la gran mayoría de los trabajos mecanizados en la agricultura se realizan cuando el suelo tiene la humedad cercana a la más factible para compactarlo. Es común asociar la compactación en alta humedad a las profundas huellas dejadas en el terreno húmedo.

Se considera que en realidad lo que ocurre fue una falla, enterrándose en ocasiones la capa vegetal que está bajo el rodaje y levantando las capas superiores del subsuelo. Este fenómeno trae consigo una ligera destrucción en el perfil de la superficie del cantero establecido para el cultivo y causando daños mecánicos al sistema radicular, lo cual puede resultar tan o más perjudicial como la propia compactación, pero son fenómenos diferentes.

En este tipo de suelos el uso intensivo de maquinarias tiene efecto negativo sobre las propiedades físicas del mismo y en ocasiones provocan daño a los surcos de la caña. Cuando la cosecha se realiza en condiciones húmedas los suelos pueden presentar contenidos de humedad cercanos a la saturación, disminuyendo la capacidad portante del suelo, lo que provoca el enterramiento de los tractores y vagones, la compactación del suelo y daños directos sobre la cepa de la caña (Cuellar; Santo, 2010).

El tráfico vehicular está directamente vinculado con la compactación inducida en el suelo bajo producción agrícola, siendo la humedad y la textura los aspectos más relevantes en cuanto a la reducción de su espacio poroso. Cuando la carga aplicada al suelo es superior a la resistencia del suelo a la compresión se produce

la deformación del suelo y con esto la compactación. La compresibilidad se refiere a la facilidad con la cual el suelo decrece en volumen cuando soporta una presión aplicada. Mayor compresibilidad indica mayor susceptibilidad de un suelo a la compactación.

Los suelos secos son menos susceptibles a la compactación que los húmedos y en la medida en que aumenta el contenido de arcilla mayor es el índice de compresibilidad del suelo. En suelos arcillosos son mayores los riesgos de compactación a niveles que afecten la producción agrícola y mayor será la persistencia del daño realizado (Botta *et al.*, 2002).

La compactación en los suelos agrícolas es un problema que conlleva a la utilización de energía en las labores, alto consumo de recursos y la degradación del suelo haciendo que se pierdan sus propiedades y así mismo obteniéndose bajas tasas de rendimiento en la producción. La compactación del suelo ocurre cuando se aplica presiones o cargas a la superficie del mismo, como resultado de pisoteo de animales, personas y la inadecuada utilización de equipos como tractores, especialmente cuando el suelo está húmedo. La compactación causa cambios en las propiedades físicas del suelo, aumentando la resistencia a la penetración, a la densidad aparente y reduciendo la porosidad (Demuner *et al.*, 2013).

La compactación del suelo es básicamente un proceso acumulativo de aumento de la densidad aparente y de la resistencia a la penetración, por una reducción de la macroporosidad que causa efectos negativos sobre el desarrollo radicular, disminución de la actividad biológica e insuficiente aporte de oxígeno por mala ventilación del suelo, la tasa de infiltración disminuye y los campos se erosionan o permanecen largo tiempo inundado (Gonzalez *et al.*, 2004a).

Según Iglesias *et al.* (2009) la compactación del suelo provoca disminución de los rendimientos agrícolas, mayores requerimientos energéticos en labranza y labores culturales, necesidades de resiembra, mayores dosis de agroquímicos y números de pasadas de los equipos, necesidades crecientes de fertilizantes e ineficiencia en el uso de la maquinaria.

La compactación del suelo se puede conocer a través del cambio provocado en propiedades del suelo como: densidad aparente, porosidad total, índice de poros, volumen específico y por el efecto de esta y otras propiedades en la resistencia a la penetración y la permeabilidad al aire y al agua (Hamaz; Anderson, 2004).

El crecimiento de la caña de azúcar puede ser afectado en el período lluvioso por la alta humedad y encharcamientos existentes en los campos y en el de extrema sequía por los agrietamientos, causando daños en el sistema radical.

Por la gran importancia que tiene para nuestro país el cultivo de la caña de azúcar y constituir los suelos Vertisoles una fuente importante para su desarrollo se considera decisivo desde el punto de vista económico y medioambiental la búsqueda de formas y métodos para atenuar la compactación.

### 1.3 Modelos para la predicción de la compactación del suelo.

La modelación y simulación ofrecen la posibilidad de disminuir el tiempo, esfuerzo y cantidad de recurso 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 producido el desarrollo de la simulación en el área agrícola (Lopez *et al.*, 2007b).

Debido a las limitaciones de los modelos desarrollados para simular la compactación es necesario buscar nuevas técnicas 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.

El uso de simulaciones para la predicción de procesos agrícolas ha tenido un rápido desarrollo en los últimos años, debido a múltiples factores y entre ellos primeramente, la necesidad de desarrollar soluciones a muy corto plazo para los problemas actuales del manejo agrícola y medio ambiental (Lopez *et al.*, 2007b). Dentro de estos los modelos de predicción de la compactación se han convertido en un medio para realizar recomendaciones e implementar estrategias de administración de la maquinaria y el suelo Keller *et al.* (2007). En su desarrollo adquiere una importancia sustancial el considerable progreso en la capacidad

computacional, la cual ha permitido expresión de los límites de respuesta de los modelos, facilitando al avance constante en la utilización de los métodos numéricos.

El Método de Elementos Finitos (MEF) es utilizado para resolver problemas complejos en la ingeniería, que contengan no linealidades geométricas y materiales. En la investigación de la compactación se incluyen ambas, debido tanto al suelo, que es un material elastoplásticos, el cual incluye grandes desplazamientos y deformaciones, como las características de los neumáticos, los cuales están compuestos por capas con propiedades diferentes cada una.

La disponibilidad de códigos de elementos finitos comercial, de propósitos generales, como ANSYS, ABAQUS, o COSMOS, los cuales incorporan comportamiento elastoplásticos del suelo y otras leyes constitutivas más específicas, hacen al método de elemento finito una técnica adecuada para resolver problema de interacción máquina-suelo (Kirby *et al.*, 1995). El elemento MEF ha sido ampliamente empleado para la simulación de la compactación del suelo debido a que representa con mayor precisión el fenómeno físico real de la interacción neumático-suelo que los métodos empíricos o analíticos, siendo especialmente adecuado para el estudio de los fenómenos referido a deformación, tracción y compactación. (Wulfsohn; Adams, 2002).

El desarrollo de la computación permitió acercar cada vez más los modelos a las características del suelo y los neumáticos, lográndose representar adecuadamente las condiciones límites impuestas en la superficie de contacto entre ambos. El empleo de ensayos de suelos normalizados y la expansión y desarrollo de la instrumentación para obtener las propiedades, necesarias como datos de entrada de los modelos, así como, la utilización de relaciones constitutivas que describen más acertadamente el comportamiento tensión-deformación, han hecho que el MEF se convierta en una herramienta muy utilizada para predecir la compactación del suelo.

Los modelos desarrollados a escala internacional se han establecido para suelo con diferente textura, principalmente para suelos de regiones templadas o frías.

Debido a las inherentes variaciones de las propiedades del suelo, no son aplicables a otros. Estos modelos no están disponibles en el mercado, siendo utilizados solo por los grupos de investigación que los han desarrollado, o por personal al que ellos se los han cedido.

Los modelos de elementos discretos (MED) o distintos (modelos de partículas) se basan en el estudio de los problemas de ingeniería a una escala cada vez menor, en la actualidad hasta escala microscópica (Recarey, 2000). El MED es un método de mecánica computacional desarrollado por Cundall (1971) para el análisis de materiales granulares y con posterioridad se aplicó a los sólidos por Cundall y Strack (1979). Las formulaciones originales del MED fueron derivadas para materiales friccionantes y han sido aplicadas para analizar el comportamiento de suelos arenosos extendiéndose posteriormente a suelos cohesivos (Upadhyaya *et al.*, 2002).

En MED, se asume que el material sólido puede ser representado por una colección de partículas rígidas, desplazándose independientemente unas de otras, interactuando entre si debido a fuerzas normales y tangenciales. A nivel de cada partícula se hace uso de la mecánica del cuerpo rígido. El modelo constitutivo o de comportamiento del material se establece en la zona de contactos entre partículas y queda caracterizado por varios elementos mecánicos como: muelles, pistones y elementos de fricción (Recarey, 2000).

La aplicación del MED tiene actualmente dos principales limitaciones, referidas a la alta capacidad computacional imprescindible para desarrollar los modelos aun para resolver problemas sencillos, dado que las ecuaciones de movimiento de cada partícula dentro del sistema y sus interacciones son calculadas continuamente (Upadhyaya *et al.*, 2002). Otra limitación representa la ausencia de códigos comerciales disponibles para su empleo.

La base del modelo analítico fue desarrollada por Boussinesq (1885) quien estableció una solución para la programación de las tensiones verticales, originadas por un punto de carga,  $P$ , o área circular cargada, influyendo sobre un medio elástico ideal, seminfinito, isotrópico y homogéneo (Keller, 2004).

Posteriormente este modelo fue mejorado por Frohlich (1934) y Sohne (1958), constituyendo la base de Gupta y Larson (1982), O` Sullivan, Henshall y Dickson (1999), Arvidsson et al, 2001.

El procedimiento inicial fue desarrollado para las condiciones de suelo saturado encontrado en la Ingeniería Civil y luego adaptado a las condiciones de suelo agrícola.

El modelo analítico consta de tres partes principales:

- 1) área de contacto y distribución de la presión sobre esta.
- 2) modelación de la propagación de las tensiones en el suelo.
- 3) obtención de una adecuada relación tensión cambio de volumen.

Las principales limitaciones del modelo son que el cálculo de las transmisiones de tensiones se hace asumiendo un coeficiente Poisson de 0,5 el cual implica que no hay cambio de volumen. El análisis también asume pequeñas deformaciones, sin embargo ocurren deformaciones grandes y permanentemente en la superficie del suelo durante el paso de las ruedas.

El modelo no es estrictamente aplicable a la capa superficial del suelo suelto. Para vencer estas dificultades utiliza un procedimiento para aplicar la carga en cuatro incrementos, logrando mantener pequeña la deformación. Este modelo permite la simulación del paso de varias ruedas, el suelo es elásticamente descargado después de cada rodada, mientras la deformación plástica y el desplazamiento permanecen y forman las condiciones iniciales de la otra pasada.

#### 1.4 Simulación de la predicción de tracción

El proceso de diseño y desarrollo de equipamiento agrícola incluye un largo y costoso proceso de pruebas antes de que llegue al mercado el producto o se decidan los elementos principales de los sistemas de fuerza o el sistema de rodaje del tractor, o estos últimos en los remolques o máquinas agrícolas. Las ecuaciones de predicción de tracción constituyen eficaces medios para la disminución de los costos asociados a este proceso.

Dentro de los métodos de predicción de tracción, los que utilizan el índice de cono, son los más ampliamente utilizados. Todos ellos plantean procedimientos de cálculo similares, a partir de ecuaciones de regresión obtenidas experimentalmente.

El desarrollo de los modelos modernos de predicción de tracción comenzó con los trabajos de Bekker (1960), otros continuadores fueron Wismer; Luth (1972), Gee-Clough (1980), Turnage (1972), y otros. Dentro de los modelos desarrollados el más empleado ha sido el cual fue desarrollado con la realización de curvas procedentes de resultados de pruebas de campo de 121 combinaciones de neumático-suelo, las cuales incluyeron 2500 ensayos a diferentes tipos de tractores, neumáticos y condiciones de suelo, desde cohesivos hasta friccionables. Brixius lo recomienda para predecir la tracción desde tractores de alta capacidad traccional, como los utilizados para las labores más pesadas, hasta los utilizados en los trabajos en huertos o jardines.

#### 1.5 Análisis de las investigaciones realizadas sobre el tema objeto de estudio.

La modelación y simulación ha sido ampliamente aplicada para investigar el efecto del tráfico de neumáticos y esteras sobre el suelo. Varios son los modelos desarrollados con el objetivo de estimar o predecir la compactación originada por tractores y remolques, así como de la influencia de los parámetros de los neumáticos y tractores (Wismer; Luth, 1972).

El modelo para la simulación de la compactación del suelo SOCOMO Van den Akker (2004) fue desarrollado para calcular los esfuerzos sobre el suelo provocados por la carga en las ruedas de tractores agrícolas. En casos específicos, los esfuerzos sobre el suelo son comparados con la resistencia del suelo medida en el laboratorio. Los esfuerzos calculados fueron también comparados con resistencias conocidas del suelo o resistencias del suelo determinadas mediante funciones de pedotransferencia.

La compactación y deformación del suelo se previenen cuando los esfuerzos ejercidos por los sistemas de rodaje son inferiores a la resistencia actual del suelo. Para validar el modelo se realizaron experimentos de tráfico y se midió el

esfuerzo, la compactación y la deformación en el subsuelo causada por las cargas de las ruedas. La validación fue exitosa y el modelo se ha usado para comparar los esfuerzos bajo neumáticos de baja y presión normal, así como bajo ruedas tándem o configuración dual (Van den Akker, 2004).

Keller *et al.* (2007) desarrolló un modelo para la predicción de la compactación que fue nombrado "Soilflex". Este calcula el estado de esfuerzos, los cambios en la densidad de volumen y desplazamientos verticales en el suelo debido al tráfico agrícola. Primero se calculan los esfuerzos normales y tangenciales, después se obtiene la propagación de esfuerzos en la profundidad del suelo y por último se calcula la deformación del suelo.

Lozano *et al.* (2013) aplicó el modelo Soilflex al tráfico de camiones y remolques tirados por tractores durante la cosecha de caña de azúcar en Brasil. Los autores utilizaron el modelo para simular el cambio en la densidad aparente del suelo en función de diferentes humedades del suelo, en un área delimitada. Ellos obtuvieron que los esfuerzos verticales producidos por el camión y los remolques provocaron compactación del suelo a profundidades mayores a 0,2 m, cuando las densidades de volumen del suelo fueron de 1,3; 1,4 y 1,5 g cm<sup>-3</sup>.

Aunque la predicción de tracción ha sido abordada por múltiples autores, los trabajos de Wismer y Luth y los de Brixius constituyen la base de los criterios más extendidos y empleados para estimar las cualidades de tracción de tractores y remolques. Brixius (1987), desarrolló ecuaciones para predecir el desempeño de tractores con neumáticos operando en suelos desde arcillosos hasta arenosos. Estas ecuaciones fueron revisiones de las publicadas por Wismer; Luth (1972). Con estas se logra mejorar la predicción de tracción y extender su rango de aplicación. El torque en las ruedas, resistencia a la rodadura, fuerza de tiro a la barra y la eficiencia de tracción son predichas en función del índice de cono, carga en la rueda, tamaño de los neumáticos y su organización en el sistema de rodaje en simples o duales. Estas ecuaciones pueden ser aplicadas a tractores de ruedas desde motocultores hasta los grandes tractores que se utilizan para el movimiento de tierra.

Estas teorías de predicción se han aplicado a la evaluación de neumáticos agrícolas, como la investigación de Castillo (1992), quién realizó la evaluación de dos neumáticos agrícolas que presentaban diferencias en el diseño del tacón, a fin de establecer sus características de tracción en condiciones difíciles (índice de cono < 400 kPa).

Al-Hamed *et al.* (1990) realizó comparaciones entre los resultados de ensayos a tractores y los obtenidos con el modelo de Brixius (1987). Los parámetros del desempeño usados en las comparaciones fueron patinaje, fuerza a la barra y eficiencia tractiva. El porcentaje de diferencia fue calculado y se estableció un rango de 10% de diferencia como aceptable. Para el patinaje 37 de 41 tractores, para la fuerza a la barra 21 de 41 y para la eficiencia de tracción 19 de 33 tractores, mostraron valores en el rango de aceptable.

Okello (1994) evaluó el funcionamiento en tracción de un tractor con esteras de goma y de un tractor con neumáticos. Las pruebas se llevaron a cabo con cargas verticales de 16,68 kN y 19,62 kN para ambos tractores, en condiciones diferentes de suelo. El autor encontró que la resistencia a la rodadura de la estera era mayor que en el neumático, la cadena logró mayor coeficiente de tracción que el neumático, pero la eficiencia de tracción fue menor debido a la mayor resistencia a la rodadura. El trabajo mostró que el cambio del neumático por la estera de goma en tractores agrícolas puede potencialmente reducir la compactación del suelo, reducir los daños al suelo por corte y mejorar la tracción.

Los tractores de la clase traccional 14 kN resaltan por su número en la agricultura cubana. La metodología utilizada es la proporcionada por el modelo de predicción de tracción de Brixius (1987), los principales coeficientes y fuerzas que caracterizan la dinámica de tracción (resistencia a la rodadura, fuerza de tracción, coeficiente de resistencia a la rodadura, coeficiente de tracción neta, coeficiente de tracción bruta y eficiencia de tracción) se obtuvieron en función del índice de cono del suelo (González *et al.*, 2008).

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

## Capítulo 2. Materiales y Métodos

### 2.1 Metodología para simular el efecto sobre el suelo del tráfico, del equipamiento para el transporte de la caña de azúcar en condiciones de elevada humedad

Para la simulación del efecto sobre el suelo del tráfico de los medios de transporte de la caña de azúcar se utilizó el modelo analítico TASC 3.0. Este software está basado en una hoja de cálculo Excel (Figura 1) sobre la que se indican los datos del neumático y las condiciones del suelo sobre las que se realiza el tráfico. Se trabajó con los tractores XTZ 150K-09, YTO 1604 y el remolque autobasculante 7CX (SC)-10. Estos medios están disponibles en la UEB José María Pérez, UBPC Chiqui Gómez Lubian y del Bloque 10-05 Campo 8 se tomaron los datos del suelo necesarios para las simulaciones. La Tabla 1 muestra los datos de entrada del suelo usados en la simulación.

Tabla 1. Datos de entrada del suelo usados en la simulación.

Dato solicitado por el software	Dato insertado para la simulación
Humedad del suelo	Suelo húmedo
Textura del suelo	Suelo arcilloso
Máxima profundidad de labranza	0,25 m
Dureza del suelo en la superficie	Blando

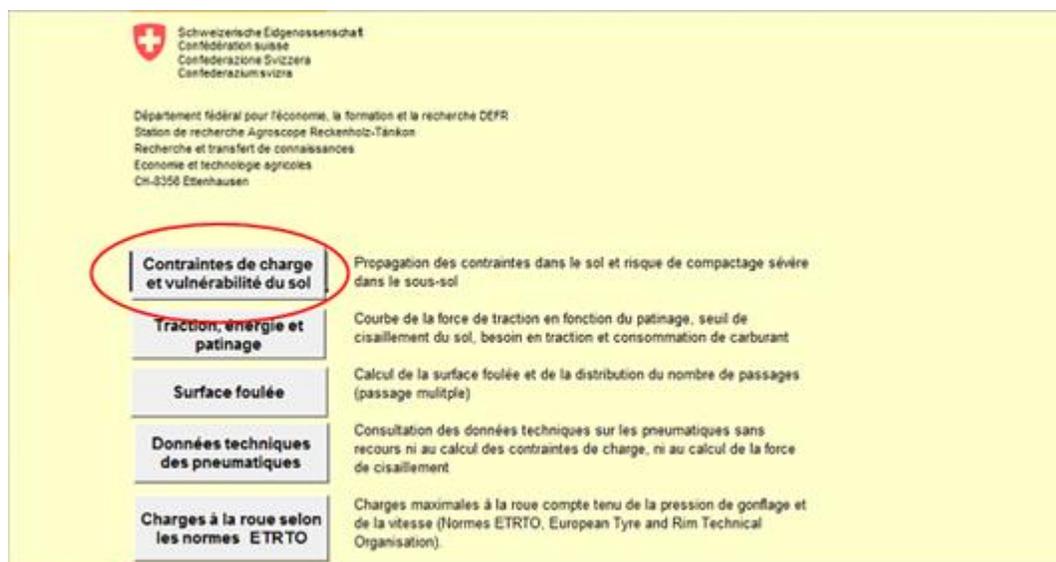


Figura 1. Hoja de cálculo de inicio del software TASC 3.0.

Los datos de entrada de los equipos utilizados en las simulaciones aparecen en la Tabla 2. La Figura 2 muestra la hoja de cálculo para la entrada de los datos al software.

Tabla 2. Datos de entrada de los equipos utilizados en las simulaciones.

Equipo	Eje	Tipo de neumático	Estructura	Ancho (m)	Diámetro exterior (m)	Carga (kg)	Presión inflado (bar)
Autobasculante	Delantero	600/50-22,5	Diagonal	0,60	1,17	6900	2,9
Autobasculante Yto 1604	Trasero	600/50-22,5	Diagonal	0,60	1,17	11280	2,9
Yto 1604	Delantero	460/85R24	Radial	0,48	1,66	3740	1,3
Yto 1604	Trasero	18,4-38	Diagonal	0,47	1,77	5900	2,8
XTZ 150K	Delantero	540/65R24	Radial	0,54	1,4	4680	1,7
XTZ 150K	Trasero	540/65R24	Radial	0,54	1,4	4240	0,9

Se declara el suelo como arcilloso, la profundidad de labranza es 25cm y que la capa superficial del suelo estaba con baja firmeza o blanda. La Figura 2 muestra la hoja para la entrada de los datos.

Description: **Wheel/track comparison - soil comparison**

Management - soil moisture: Farming - humid soil - pF 1.8      maximum tilling depth [cm]: 25

Soil texture at the max. tilling depth: Clay soil      Clay content [%]:  
Silty content [%]:

Variant	Tyre/ track type	Tyre structure	Tyre/ track-width	Tyre diameter track length	Tyre/ track load	Tyre inflation pressure	Hardness of topsoil	Contact area	Mean contact pressure	Severe soil compaction risk**	Severe soil compaction risk up to a depth of...	
Delete all entries	no/ni/tr/ra	d/r	[cm]	[cm]	[kg]	[bar]*	[kgf]	[cm <sup>2</sup> ]	[bar]*	no / yes	[cm]	
Select tyre 1	Variant 1	FARMING / traction tyres										
	T 150K, delantero, 540/65 R 24	ni	r	52	131	5080	1.7	soft	3590	1.39	yes	39
Select tyre 2	Variant 2	FARMING / traction tyres										
	T 150K, trasero, 540/65 R 24	ni	r	52	131	3380	1.7	soft	2732	1.21	yes	31
Select tyre 3	Variant 3	FARMING / traction tyres										
	YTO 1604, delantero, 460/85 R 34	no	r	48	166	3740	1.3	soft	3407	1.08	yes	31
Select tyre 4	Variant 4	FARMING / traction tyres										
	YTO 1604, trasero, 18.4 R 38	no	r	49	177	5900	2.8	soft	3221	1.80	yes	44

Figura 2. Hoja para la entrada de datos.

Dentro de los datos necesarios para la simulación se encuentran el peso del remolque y el tractor y la presión de inflado de los neumáticos. El peso se obtuvo en una balanza digital de nivel de apreciación 1 kg, en este se pesaron los tractores y el remolque con carga, como se aprecia en la Figuras 3 y 4.



Figura 3. Determinación del peso del remolque.



Figura 4. Determinación del peso del tractor XTZ 150K-09.

Para la obtención de la presión de inflado se utilizó un manómetro mecánico de nivel de apreciación 0,1 bar. Se obtuvo la presión de inflado para cada neumático y después se introdujo el promedio de presión de inflado en cada eje de carga. La Figura 5 muestra el proceso de obtención de la presión de inflado.



Figura 5. Medio para determinar la presión de inflado.

2.2 Metodología para simular la demanda de tracción del remolque autobasculante y las cualidades de tracción de los tractores utilizados en la cosecha en alta humedad.

La metodología de cálculo se estableció a través del modelo de predicción de (Brixius, 1987), propuesto por (Srivastava *et al.*, 2006), (Zoz; Grisso, 2003), (Goering *et al.*, 2003). Se determinaron las principales dimensiones del neumático, según se establecen en (Srivastava *et al.*, 2006), a partir de las dimensiones básicas según se establecen en la Figura 6.

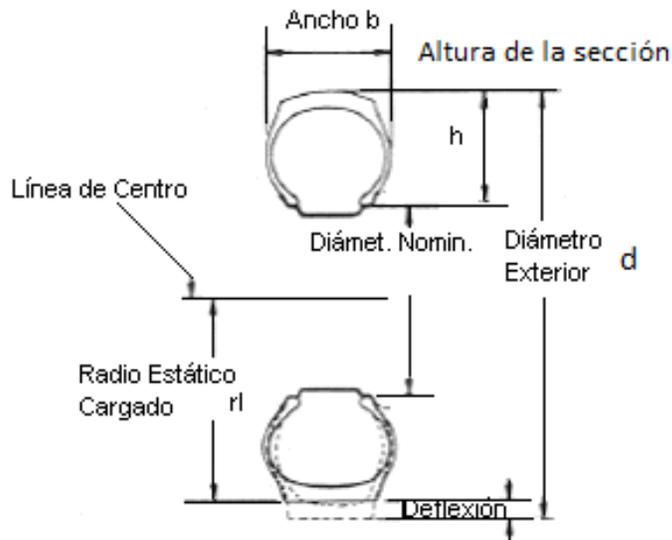


Figura 6. Principales dimensiones del neumático.

Se estableció una dureza del suelo de 700 KPa la cual corresponde con un suelo blando, valor presente durante la cosecha de alta humedad. Se corrió el modelo con patinajes desde 4 hasta 34%.

El patinaje se seleccionó como el que proveyó la mayor eficiencia de tracción en esta condición del suelo. Después de seleccionar el patinaje al cual realizar las simulaciones se realizaron estas para índice de cono (IC) desde 700 KPa hasta 1000 KPa valores estos que se corresponde con baja dureza del suelo.

Las ecuaciones de predicción fueron establecidas sobre una hoja de cálculo de Excel, lo cual facilitó el procesamiento de la información y la obtención de las figuras que describen los resultados obtenidos.

La metodología de cálculo utilizada fue la siguiente

Cálculo del peso dinámico

$$Wdr = Wsr + Cdw * Fhx \quad (1)$$

$$Wdf = Wsf - Cdw * Fhx \quad (2)$$

Donde:

$Wdr$  – Peso dinámico en el eje trasero      kN

$W_{df}$  – Peso dinámico en el eje delantero kN

$W_{sr}$  – Peso estático en el eje trasero kN

$W_{sf}$  – Peso estático en el eje delantero kN

$C_{dw}$  – Coeficiente dinámico de transferencia de peso, 0.20 para implementos remolcados, Srivastava y col. (1992).

Cálculo del Número de Movilidad ( $B_n$ ). Teniendo en cuenta que el ancho del neumático se refiere al ancho combinado de todos los neumáticos que soportan el peso del eje

$$B_n = \frac{IC * b * d}{W_d} * \left( \frac{1 + 5 * \frac{\delta}{h}}{1 + 3 * \frac{b}{d}} \right) \quad (3)$$

Donde:

$\delta$ - Deflexión. m.

d- Diámetro interior del neumático. m.

Cálculo del Coeficiente de Resistencia al Movimiento ( $\rho$ )

$$\frac{R_m}{W_d} = \rho = \left[ \left( \frac{1}{B_n} \right) + 0.04 + \left( \frac{0.5 * S}{\sqrt{B_n}} \right) \right] \quad (4)$$

Donde:

S- Patinaje

Cálculo del Coeficiente de Tracción Bruta ( $C_g$ ).

$$\frac{T}{r_l * W_d} = C_g = 0.88 * (1 - e^{(-0.1 * B_n)}) * (1 - e^{(-7.5 * S)}) + 0.04 \quad (5)$$

$r_l$ - Radio estático cargado. m.

Cálculo del Coeficiente de Tracción Neta ( $C_n$ ).

$$C_n = C_g - \rho \quad (6)$$

Donde:

$C_g$  -Coeficiente de tracción bruta.

$\rho$  -Coeficiente de Resistencia a la Rodadura

Cálculo de la fuerza a la barra de tiro o tracción neta

$$F_{hx} = C_n * Wd \quad [7]$$

Cálculo de la Eficiencia de Tracción

$$\eta_t = \frac{C_n * (1 - S)}{C_g} \quad (8)$$

Tabla 3: Tipos de neumáticos utilizados.

Equipo	Tipos de Neumáticos	b (m)	d (m)	h (m)	rl (m)	rA	$\delta$ (m)
Autobasculante	600/50-22,5	0,60	1,17	0,3	0,5	0,5	0,08
XTZ 150K 09	460/85 R34	0,49	1,67	0,42	0,75	0,85	0,08
YTO 1604(eje delantero)	18,4-38	0,47	1,75	0,41	0,81	0,87	0,06
YTO 1604(eje Trasero)	540/65 R24	0,54	1,4	0,40	0,62	0,73	0,07

## **Resultados y discusión**

## Capítulo 3. Resultados y discusión

3.1. Resultados de la simulación del efecto sobre el suelo del tráfico, del equipamiento para el transporte de la caña de azúcar en condiciones de elevada humedad.

La Figura 7 muestra los esfuerzos de compresión sobre el suelo provocados por el tractor YTO 1604 y el remolque autobasculante. La simulación establece un valor de esfuerzo umbral o valor crítico del esfuerzo a partir del cual, esfuerzos superiores provocan compactación del suelo. Este esfuerzo umbral el software lo establece a partir de relaciones de regresión en los que incluye los valores normales de la densidad de volumen del suelo a los que se provoca compactación, en dependencia de las características y estado del suelo establecido en el modelo. La presión umbral establecida para este tipo de suelo es de 80 kPa (0.8 bar), la figura muestra como en todos los casos se ejercen presiones sobre el suelo que superan los 25 cm de profundidad.

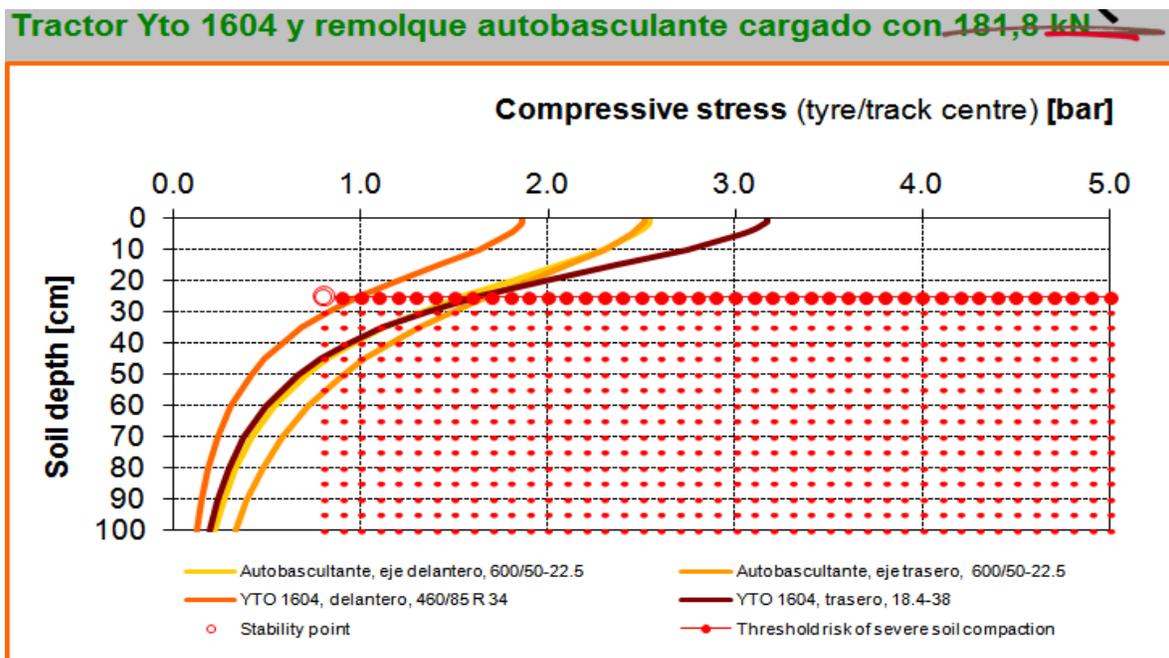


Figura 7. Esfuerzos de compresión provocados en el suelo por el tractor YTO 1604 y el remolque autobasculante.

La Figura 8 muestra los bulbos de presión que se generan con el paso del tractor YTO 1604 sobre el suelo húmedo. Aquí se aprecian que las presiones críticas en el puente delantero pudieran alcanzar los 20 cm de profundidad y en el trasero los 30 cm. Los esfuerzos de compresión que provoca el tractor durante la cosecha en alta humedad son muy altos lo cual provoca compactación del suelo que deben solucionarse en las labores de labranza. Como solución a este problema se propone la descompactación o el cultivo profundo después de la cosecha, a profundidades superiores a la de compactación.

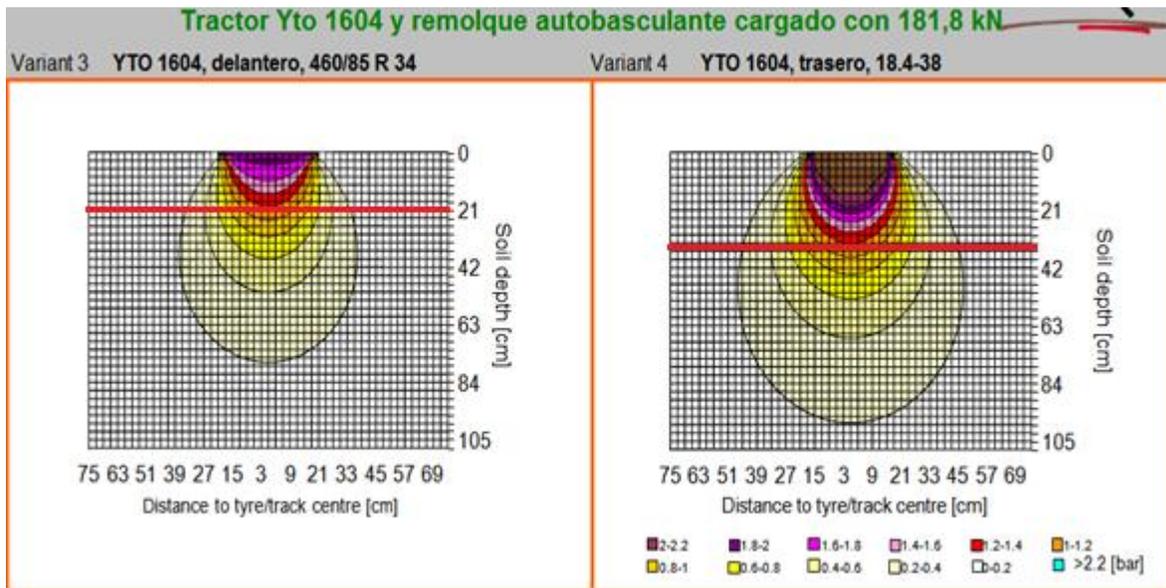


Figura 8. Bulbos de presión que se generan con el paso del tractor YTO 1604 sobre el suelo húmedo.

La Figura 9 muestra los bulbo de presión que se generan con el paso del autobasculante sobre el suelo húmedo.

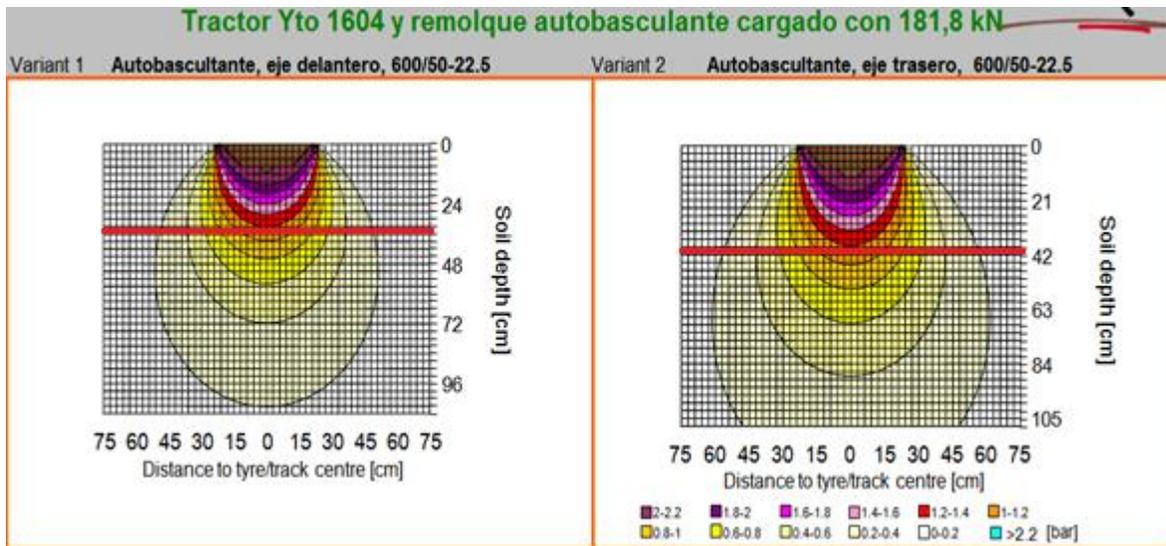
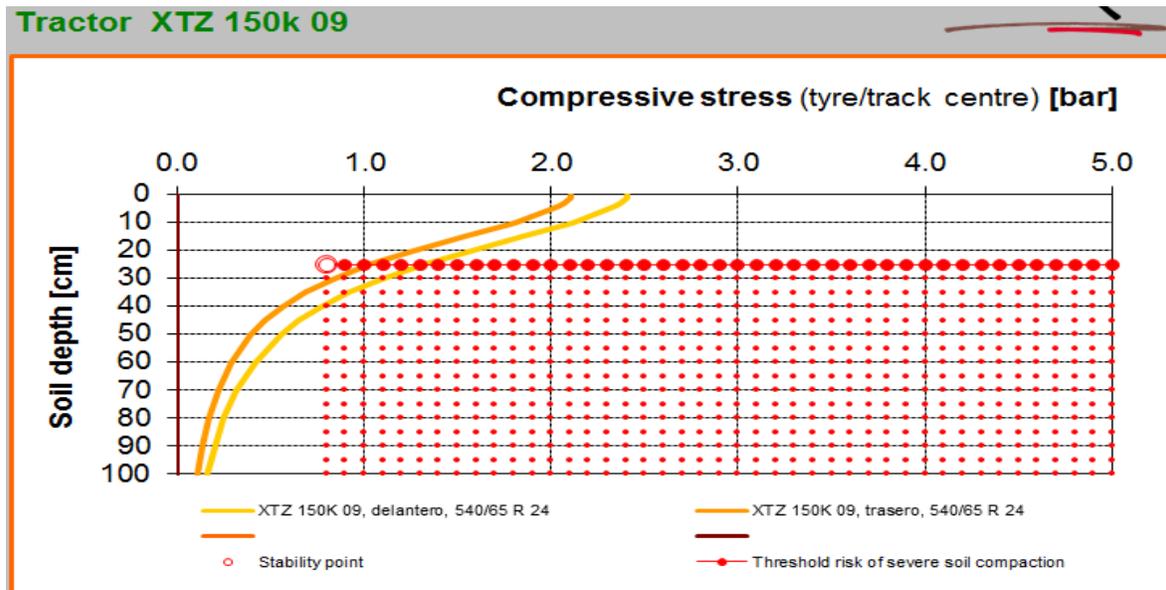


Figura 9. Bulbos de presión que se generan con el paso del Autobascultante sobre el suelo húmedo.

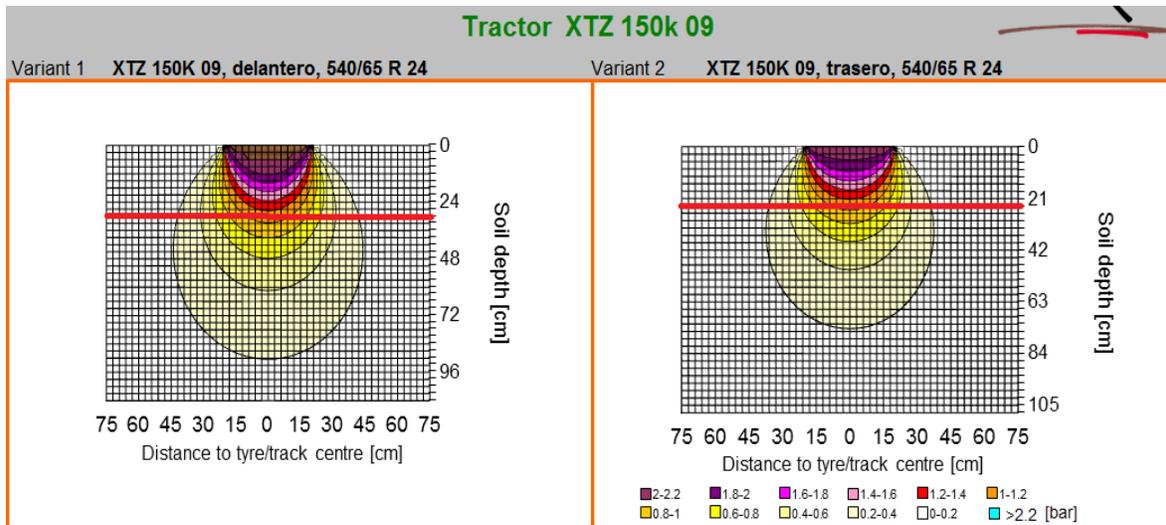
Una de las máquinas utilizada para el estudio de este trabajo fue XTZ 150K -09, destinado para realizar las labores agrícolas de alta demanda energética como la subsolación, aradura, gradeo, siembra y recolección, atenciones culturales, labores de transporte con remolques de alta capacidad. La Figura 10 muestra los esfuerzos de compresión sobre el suelo provocados por el tractor XTZ 150K -09.



La Figura 10. Esfuerzos de compresión sobre el suelo provocados por el tractor XTZ 150K -09.

Tomando en cuenta la presión umbral establecida para este tipo de suelo es de 80 kPa (0,8 bar), la figura 10 muestra como en ambos puentes del tractor XTZ 150K -09 se ejercen presiones sobre el suelo que superan los 20 cm de profundidad.

En la figura 11 se observa como el bulbo de presión crítica del puentes delantero del tractor XTZ 150K -09 alcanza los 24 cm para el trasero los 21 cm en correspondencia con la distribución de pesos del equipo.



**Figura 11.** Bulbos de presión que se generan con el paso del tractor YTO 1604 sobre el suelo húmedo.

3.2. Resultados de la simulación de la demanda de tracción del remolque autobasculante y las cualidades de tracción de los tractores utilizados en la cosecha en alta humedad.

Los resultados de la simulación de la demanda de tracción del remolque autobasculante y las cualidades de tracción de los tractores en la cosecha de alta humedad se presentan en las Figuras de la 12 a la 18.

La eficiencia de tracción es comúnmente definida como la relación de la potencia de entrada al eje motor y la potencia de tracción desarrollada. La ineficiencia del dispositivo de tracción es causada por pérdidas de velocidad y de tracción, debidas al patinaje y a la resistencia a la rodadura, las cuales tienen su máxima expresión en las condiciones de suelo blando (Figura 12).

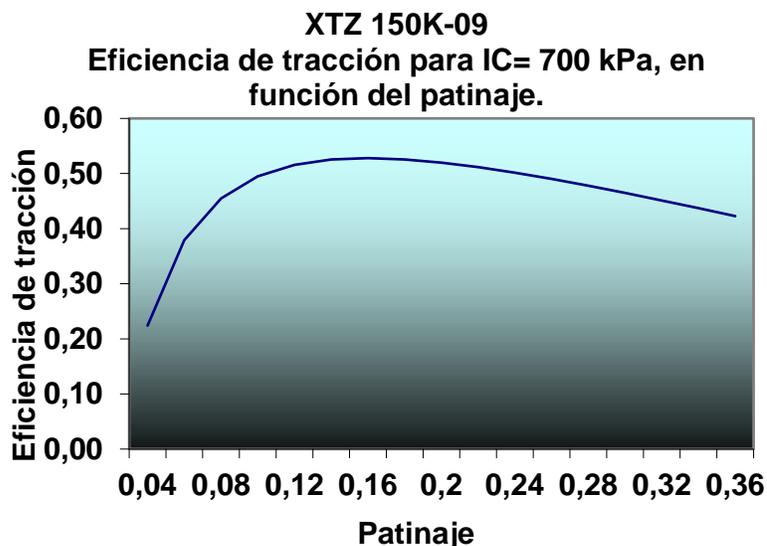


Figura 12 Eficiencia de tracción XTZ 150k-09.

Las máximas eficiencias de tracción 53% se obtienen para patinajes de 14 a 18%. Se selecciona el valor intermedio de 16% para la realización de las simulaciones a los 700 kPa de índice de cono establecidos en el capítulo anterior.

Los coeficientes de tracción del tractor, el coeficiente de resistencia a la rodadura, el coeficiente de tracción bruta y el coeficiente de tracción neta se representan en la Figura 13, para el tractor XTZ 150K-09. Aquí se aprecia como en la medida que aumenta la dureza del suelo disminuye la resistencia a la rodadura y los coeficientes de tracción aumentan. El coeficiente de tracción neta se obtiene como la diferencia entre el coeficiente de tracción bruta y el coeficiente de resistencia a la rodadura. Para 700 kPa de índice de cono se obtuvo que el coeficiente de resistencia a la rodadura obtuvo un valor de 0,16 un valor que muestra grandes pérdidas durante el movimiento debido a la formación de la huella y al desplazamiento del suelo a ambos lados de la rueda.

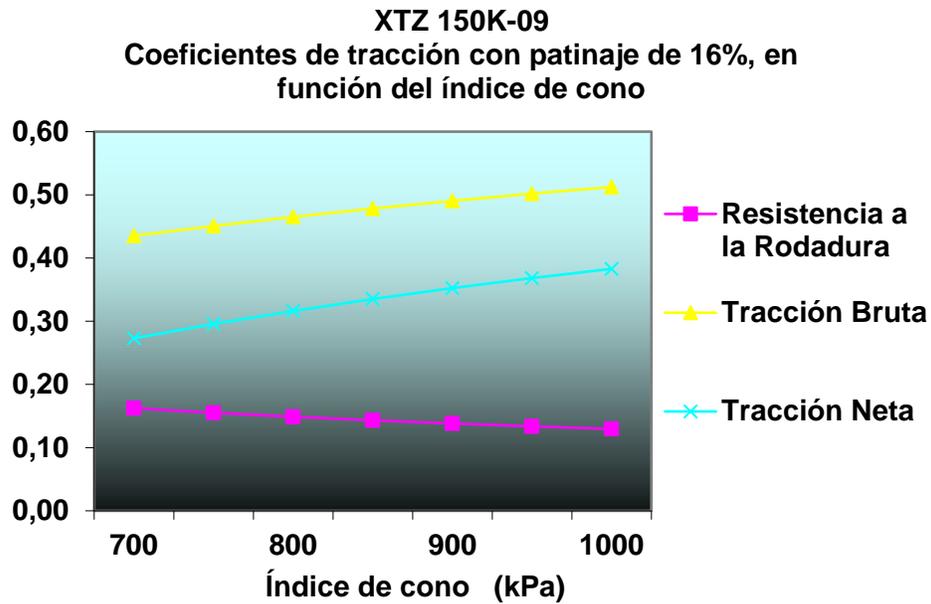


Figura 13. Coeficiente de tracción del XTZ 150k-09.

La Figura 14 muestra los valores del desempeño en tracción del tractor XTZ 150K-09, aquí se aprecia cómo disminuye fuerza de resistencia a la rodadura con el incremento de la dureza del suelo y cómo a la inversa aumenta la fuerza disponible para tracción.

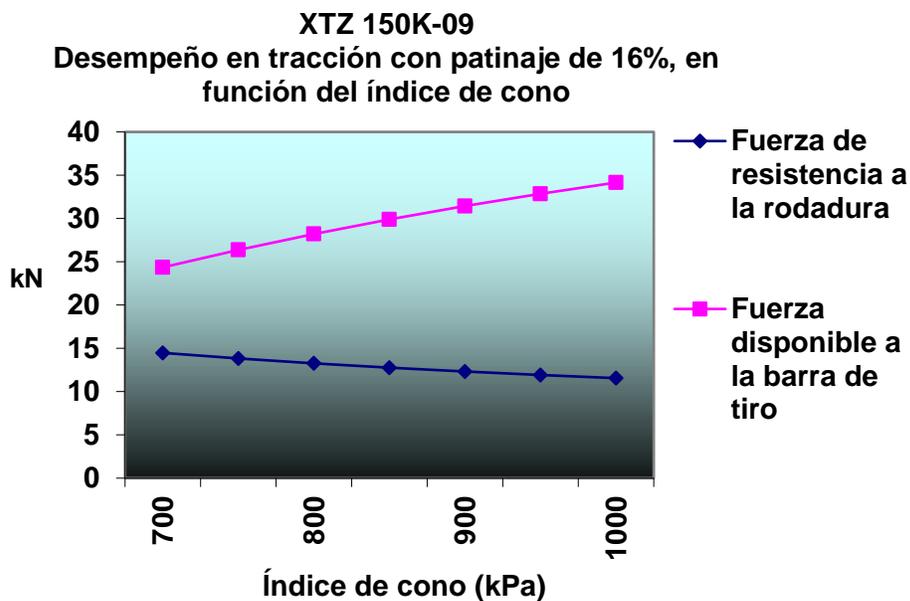


Figura 14. Desempeño en tracción del tractor XTZ150k-09.

En la Figura 15 se observan las eficiencias de tracción del tractor YTO 1604, las máximas eficiencias de tracción 56% se obtuvieron para patinajes de 14 a 18%. Se seleccionó el valor intermedio de 16% para la realización de las simulaciones a los 700 kPa de índice de cono establecidos en el capítulo anterior.

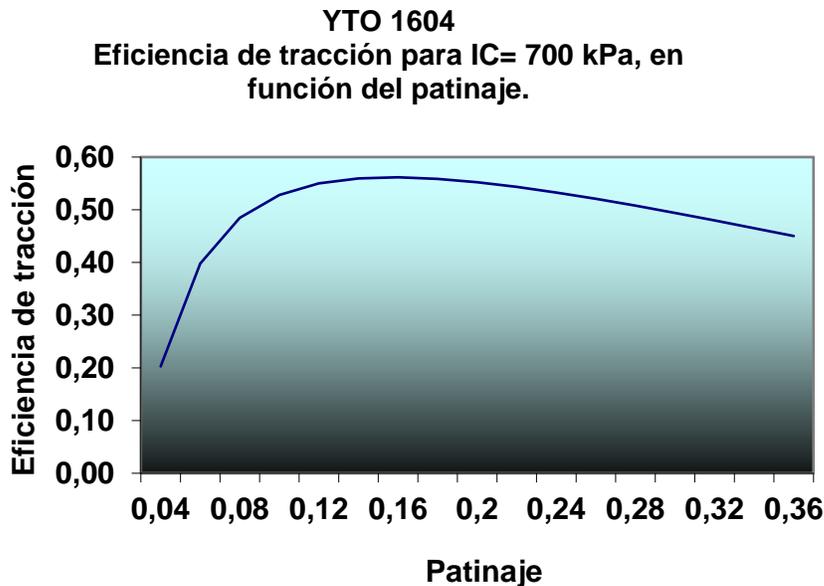


Figura 15. Eficiencia de tracción del tractor YTO 1604.

Los coeficientes de tracción del tractor, el coeficiente de resistencia a la rodadura, el coeficiente de tracción bruta y el coeficiente de tracción neta se representan en la Figura 16, para el tractor YTO 1604. Como se aprecia, los resultados son similares a los obtenidos para el tractor XTZ 150K-09, en cuanto al comportamiento de los coeficientes. En el caso del coeficiente de resistencia a la rodadura ambos tractores tienen un coeficiente de 0,16. El coeficiente de tracción neta del YTO es inferior en 0,02 al del XTZ que alcanzó los 0,27, en el caso del coeficiente de tracción bruta este es superior para el XTZ, alcanzando un valor de 0,44 siendo este 0,03 mayor al del YTO.

**YTO 1604**  
**Coefficientes de tracción con patinaje de 16%, en**  
**función del índice de cono**

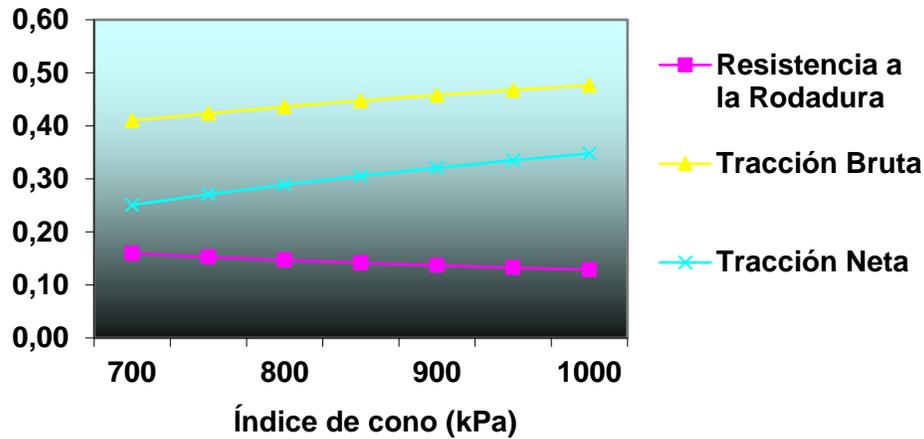


Figura 16. Coeficiente de tracción del tractor YTO 1604.

La Figura 17 muestra los valores del desempeño en tracción del tractor YTO 1604, aquí se aprecia cómo disminuye fuerza de resistencia a la rodadura con el incremento de la dureza del suelo, esta alcanza un valor de 15,36 kN con el índice de cono de 700 kPa, un poco mayor que la del tractor XTZ, fundamentalmente debido al mayor peso sobre los ejes y neumáticos más estrechos. La fuerza disponible a la barra de tiro alcanza un valor de 24,17 kN muy similar a la de 24,35 que alcanzó el tractor XTZ, lo cual indica que el desempeño en tracción de ambos tractores es muy similar.

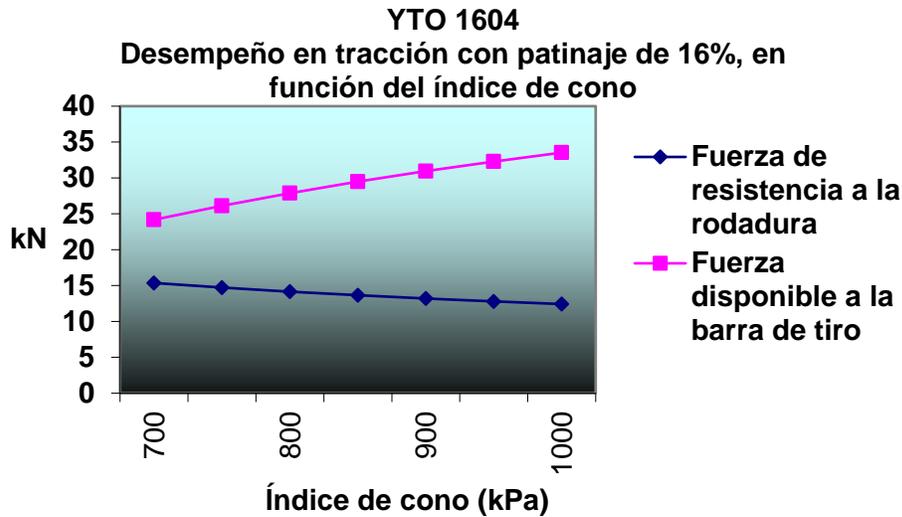


Figura 17. Desempeño de tracción con patinaje del tractor YTO 1604.

La Figura 18 muestra la fuerza de tiro del tractor y la resistencia a la rodadura del remolque, partiendo de que en ambas fuentes energéticas dicho parámetro es similar se muestra en este caso el del XTZ 150K-09.

Para las condiciones simuladas el remolque autobasculante demanda una fuerza de tracción de 45,98 kN, que no es satisfecha por ninguno de los dos tractores. Por lo tanto a esta dureza del suelo y con este nivel de patinaje no se pudiera realizar trabajos de transporte de la caña de azúcar con estos medios. En la medida que el suelo endurece la resistencia al tiro del remolque disminuye y aumenta la fuerza de tracción de los tractores, por lo que es de suponer que si la cosecha húmeda se realiza con índices de cono superiores pudiera realizarse la tracción del remolque. Otro factor que incide en estos resultados es el patinaje de los tractores, si se trabajara con un patinaje superior, también se obtendrían valores superiores de la fuerza de tracción.

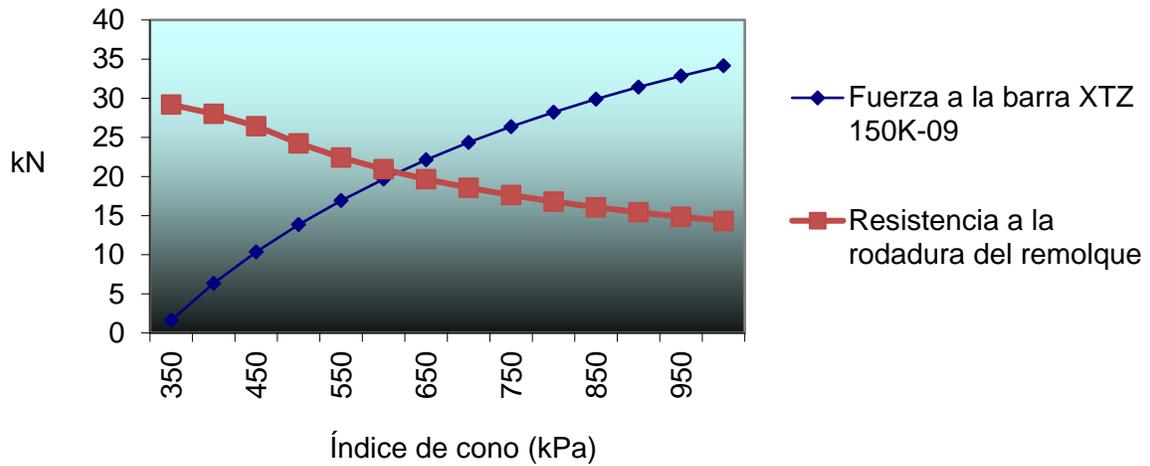


Figura 18. Fuerza de tiro del XTZ 150K-09 y resistencia a la rodadura del remolque.

El remolque analizado posee características que no son adecuadas para el trabajo en alta humedad cuando se utiliza en la carga máxima por lo que es recomendable realizar otras investigaciones de simulación al 75 y al 50% de la carga y evaluar su correspondencia con las fuentes energéticas utilizadas en el transporte intermedio de la caña.

Así mismo para el caso del tractor YTO 1604 se recomienda realizar investigaciones con neumáticos de otras dimensiones, principalmente de más ancho para lograr mayor flotabilidad y un mejor aprovechamiento del esfuerzo tractivo.

## Conclusiones

Al concluir la presente investigación se puede arribar a las siguientes conclusiones:

1. Las presiones ejercidas sobre el suelo húmedo del YTO 1604 y del XTZ 150K -09 superan los 20 cm de profundidad en ambos puentes.
2. Las máximas eficiencias de tracción del tractor YTO 1604 y del XTZ 150K-09 fueron de 56% y de 53% respectivamente, para un patinaje en ambos caso entre 14 y 18%.
3. El coeficiente de resistencia a la rodadura en ambos tractores fue similar, de 0,16.
4. El coeficiente de tracción neta del YTO 1604 es inferior en 0,02 al del XTZ 150K-09, por el contrario el coeficiente de tracción bruta en este último es superior en 0,03 respecto al primero.
5. Los tractores YTO 1604 y el XTZ 150K 09 muestran un desempeño de tracción similar de 24,17 kN y 24,35 kN, respectivamente.
6. El remolque autobasculante demandó una fuerza de tracción de 45,98 kN a máxima capacidad la cual no es satisfecha por ninguno de los dos tractores utilizados.

## Recomendaciones

1. Realizar otras investigaciones de simulación al 75 y al 50% de la carga del remolque autobasculante en las mismas condiciones de investigación.
2. Evaluar la utilización de otros neumáticos de mayor flotabilidad en el tractor YTO 1604.

## Referencias Bibliográficas.

- AL-HAMED, S., A.; R. GRISSO, D.; F. ZOZ; K. BARGEN: "Tractor performance spreadheet for radial tires.", *ASAE Paper*, (Michigan.): 1990.
- BEKKER, M., G.: *Off the road locomotion.* , Tesis University of Michigan Press., 1960.
- BETANCOURT, Y.; M. OROZCO; A. MARTINEZ; H. PEREZ; R. MARÍN; R. VILLEGAS: *Fundamentos técnicos para la implementación del complejo tecnológico cosecha-transporte en condiciones de alta humedad de los suelos cañeros de Cuba.* , vol., pp., 2015.
- BOTTA, G.; D. JORAJURIA; L. DRAGHI: "Influence of the axle load, tyre size and configuration on the compaction of a freshly tilled clayey soil.", 39(1): 2002.
- BRIXIUS, W., W.: *Traction prediction equations for bias ply tires.* , vol., pp., 1987.
- CASTILLO, H., B. : "Evaluacion de llantas agrícolas en condiciones difíciles de tracción.", *Revista ICA.*, 27: 183-188, 1992.
- CUELLAR, I.; J. SANTO: *Apuntes sobre la compactacion del suelo.*, vol., pp., 2010.
- CUELLAR, I.; J. SANTOS: *Apuntes sobre la compactación del suelo.* , vol., pp., 2010.
- DEMUNER, G.; M. CADENA; S. CAMPO: "Resistencia a la penetración en un suelo franco arcilloso a dos años de manejo con tres sistemas de labranza.", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22: 68-71, 2013.
- DEMUNER, G.; M. CADENA; S. CAMPO, G.: "Resistencia a la penetración en un suelo franco arcilloso a dos años de manejo con tres sistemas de labranza.", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias.*, 22.: 68-71., 2013.
- FRANCO, R.; J. TORRES; J. PANTOJA: "Impacto de la siembra a 1.75 en la productividad de la caña de azúcar en el Ingenio Mayaguez.", 5: 2009.
- GARCÍA, I.; M. SÁNCHEZ; M. VIDAL; Y. BETANCOURT; J. ROSA: "Efectos de la compactación sobre las propiedades físicas del suelo y el crecimiento de la caña de azúcar.", 19: 2010.
- GEE-CLOUGH, D.: "Selection of tyre sizes for agricultural vehicles.", *J. Agric. Engng*, 25: 1980.
- GOERING, C.; M. STONE; D. SMITH; P. TURNQUIST: *Off-road vehicle engineering principles.*, vol., pp., 2003.
- GONZALEZ, O.; M. HERRERA; M. RODRIGUEZ; E. LOPEZ; M. SANTOS; J. DELGADO, Á.: *Semirremolque autobasculante con neumático de alta flotación para el transporte de la caña.*, vol., pp., 2004a.
- GONZALEZ, O.; M. HERRERA; M. RODRIGUEZ; E. LOPEZ; M. SANTOS; J. Á. DELGADO: "Semirremolque autobasculante con neumático de alta flotación para el transporte de la caña azúcar.": 2004b.
- GONZÁLEZ, O.; C. IGLESIAS; M. HERRERA; E. LÓPEZ; A. SÁNCHEZ: "Selección de neumáticos para el desempeño de tractores de clase traccional 14 kN", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17(1): 7-11, 2008.
- GONZALEZ, O. R.; M. HERRERA: *Predicción del desempeño de la tracción de la maquinaria agrícola en los suelos húmedos.*, vol., pp., 2005.
- HAMAZ, M.; W. ANDERSON: "Soil Compaction in cropping systems: A review of the nature , causes and possible solution.", 82(2): 2004.
- KELLER, T.: *Soil compaction and soil tillage studie in agricultural soil mechanics.*, Tesis Tesis de Doctorado., Univesidad Sueca de Ciencias Agrícola., Uppsala, Suecia., 2004.

- KELLER, T.; P. DEFOSSEZ; P. WEISSKOPF; J. ARVIDSSON; G. RICHARD: "SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches.", 93(2): 2007.
- KIRBY, J.; S. MOCKLER; F. ZOZ: *Influence of varying axle load and tire pressure on soil and resulting compaction.*, vol., pp. Warrendale, EEUU, 1995.
- LOPEZ, E.; F. GONZALEZ; M. CID; M. A. OSORIO; M. E. RUIZ: *Modelos de simulación: una herramienta actual indispensable en los estudios del continuo agua-suelo-planta-atmosfera.*, vol., pp. La Habana, Cuba., 2007a.
- LOPEZ, F.; G. GONZALEZ; M. CID; A. OSORIO; E. RUIZ: *Modelos de simulación: una herramienta actual indispensable en los estudios del continuo agua-suelo-planta-atmosfera.*, vol., pp. La Habana, Cuba, 2007b.
- LOZANO, N.; M. ROLIM, M.; U. OLIVERA, E.; E. PEDROSA, M.: "Evaluation of soil compaction by modeling field vehicle traffic with SoilFlex during sugarcane harvest.": 2013.
- OKELLO, J., A. : "The tractive performance of tracks and tractor driving wheel tyre as influenced by design parameters.", *J. of Agricultural Engineering Research*, 59: 30-43, 1994.
- RE CAREY, C.: *Modelación del terreno y las estructuras en el dominio del tiempo.*, Tesis Universidad Central de las Villas., Santa Clara, Cuba 2000.
- RODRIGUEZ, A.: *Selección de los indicadores de la calidad de los suelos hidromorficos de la costa Norte de Villa Clara* Marta Abreu de las Villas, pp. 2010.
- RODRIGUEZ, M.: *Fundamentación del uso del rodaje por semiesteras en las cosechadoras cubana de la caña de azúcar para trabajar en suelos de mal drenaje con condiciones de alta humedad.*, Tesis Departamento de Mecanización Agrícola., Universidad Martha Abreu de Las Villas., 1999.
- RODRIGUEZ, P.: *Sistema de cosecha de la caña de azúcar: Ventajas y Desventajas.*, vol., pp., 2011.
- SRIVASTAVA, A. K.; C. E. GOERING; R. P. ROHRBACH; D. R. BUCKMASTER: en *Engineering principles of agricultural machines.*, ed, pp. Ed. ASABE, St. Joseph, Michigan, 2006.
- TURNAGE, G., W. : *Tyre selection and performance prediction for off road wheeled vehicles operation.*, vol., pp., 1972.
- UPADHYAYA, S.; U. ROSA; D. WULFSOHN: "Application of the finite element method in agricultural soil mechanics.", 2: 2002.
- VAN DEN AKKER, J.: "Socomo: a soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity.", 9: 2004.
- VASQUEZ, L.: *Estudios sobre la efectividad de la dolomita en el mejoramiento de los suelos oscuros plásticos.*, Tesis Marta Abreu de las Villas, Villa Clara, Cuba, 2003.
- WISMER, R. D.; H. J. LUTH: *Off road traction prediction off wheeled vehicel.*, vol., pp. 49-62, 1972.
- WULFSOHN, D.; A. ADAMS: "Elastoplastic soil mechanics. En Advances in Soil Dynamics", 2: 2002.
- ZOZ, F.; R. GRISSO, D.: *Traction and tractor performance.*, vol., pp. 913C0403, 2003.

