

UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

Tesis presentada en opción al título académico de Master en Ingeniería Agrícola

Modelo numérico para la simulación del suelo durante operaciones de labranza sin inversión del prisma

Autor: José Dasiell Lorenzo Rojas

Santa Clara 2018



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

Tesis presentada en opción al título académico de Master en Ingeniería Agrícola

Modelo numérico para la simulación del suelo durante operaciones

de labranza sin inversión del prisma

Autor: José Dasiell Lorenzo Rojas

Tutores: Dr. C. Elvis López Bravo

Consultante: MsC Maykel Díaz Cruz

Santa Clara 2018

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza una investigación sobre la interacción del suelo con un implemento de tipo *paratill* empleando el método de elementos discretos. El modelo se realiza en el software EDEM donde se implementan tres modelos de suelo que responden a diferentes geometrías de partículas, los modelos se definen con las mismas propiedades físicas y mecánicas del suelo. Se diseña además el *paratill* y se simula el movimiento del mismo a través de los tres bloques de suelo. Los resultados mostraron los patrones de movimiento de las partículas de suelo así como los posibles valores de esfuerzos durante el proceso de labranza. Se realiza además el análisis resistivo del implemento así como la influencia del diámetro de las partículas en la precisión de los resultados. Finalmente se verifica el modelo mediante formulaciones de la mecánica de suelo mostrando su validez.

ABSTRACT

In the present work a research on the interaction of the soil with an implement type paratill was doing using the Discrete Element Method. The model is made in EDEM software, where three soil models are implemented that respond to different particle geometries, the models are defined with the same physical and mechanical properties of the soil. The shape of the paratill is also designed, and its the movement is simulated through the three blocks of soil. The results showed the movement patterns of the soil particles as well as the possible stress values during the tillage process. The implement resistive analysis is also carried out, as well as the influence of the diameter of the particles on the precision of the results. Finally the model is verified by formulations of soil mechanics showing its validity.

DEDICATORIA

Mi tesis la dedico con todo mi amor y cariño a mis padres, abuelos, esposa y mi hijo por enseñarme el camino correcto de la vida, guiándome y fortaleciéndome cada día.

Con mucho cariño principalmente a mi tutor, fieles amigos de año, compañeros del trabajo y a mi director por apoyarme y darme el espacio que lleva este trabajo. No tengo letras para seguir diciendo la gran satisfacción que me da poder terminar esta maestría, donde profesores y compañeros dejan parte de su vida, para dar vida a las ilusiones que hoy en día se hacen realidad. Solo sé que este camino es solo el comienzo de una gran historia de virtudes.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a:

Dada la grandeza y la sencillez que significa la palabra gratitud me permite reflexionar diciendo: "que uno tiene, algo de uno y mucho de todos", por ello agradezco eternamente a la Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas por la valiosa oportunidad de alcanzar una formación profesional.

A mis compañeros de tesis por todas las experiencias compartidas en estos últimos 3 años en la universidad y en el trabajo con quienes he compartido, buenos y malos momentos y que juntos hemos conseguimos el éxito anhelado.

A los coordinadores, jefes de departamentos y profesores del Departamento de Ingeniería Agrícola y en especial a mi tutor y amigo el Dr. C. Elvis López Bravo por su constante compañía y su entrega total a esta Tesis de Maestría, y a todo el colectivo de profesores del departamento por sus buenos consejos llenos de gratitud y sinceridad.

A toda mi familia, por el apoyo incondicional

A los familiares y amigos que de una u otra forma colaboraron al desarrollo y conclusión

de mi carrera como Ingeniero Agrícola.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN1
CAPÍTULO I 4
1.1 Herramientas de labranza para la conservación de suelos4
1.2 Estudios experimentales del comportamiento mecánico del suelo5
1.3 Métodos numéricos para la simulación dinámica del suelo6
1.4 EL Método de los Elementos Discretos (MED)7
1.5 Investigaciones de los modelos DEM10
1.6 Labranza sin inversión del el prisma11
1.7 Principales teorías sobre la falla de los suelos15
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS17
2.1 Determinación de las propiedades físicas del suelo17
2.2 Metodología del ensayo de compresión triaxial18
2.3 Metodología para la calibración del modelo virtual
2.4 Metodología para el ensayo de corte directo modificado23
2.5 Descripción del órgano de trabajo28
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN
3.1 Propiedades mecánicas del suelo 30
3.1.1 Curva de tensión-deformación 30
3.1.2 Resistencia cortante del suelo
3.1.4 Comportamiento de la cohesión del suelo35
3.1.5 Comportamiento de adhesión del suelo
3.1.6 Fricción interna y externa del suelo38

3.2 Resultados de la calibración del modelo virtual41
3.3 Influencia de las dimensiones de las partículas sobre la fuerza de tiro
3.4 Verificación analítica del modelo45
3.5 Generación del bloque de suelo46
3.6 Análisis de la rigidez de la herramienta48
3.7 Análisis del patrón de velocidad de las partículas50
3.8 Resultados de la velocidad y la fuerza de tiro51
3.9 Análisis de la variación de la energía cinética53
3.10 Simulación de la labranza54
CONCLUSIONES
RECOMENDACIONES
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

INTRODUCCIÓN

Para el crecimiento y desarrollo de las plantas se requiere que el suelo esté perfectamente mullido, con una adecuada aireación, humedad y nutrientes. Estos requerimientos se logran con una correcta preparación del suelo y una adecuada rotación de los cultivos. En nuestro país el empleo de técnicas inadecuadas de roturación y cultivo, el excesivo número de operaciones de laboreo del suelo y el uso de implementos y máquinas inadecuadas han contribuido que los suelos se hayan ido erosionando de una forma alarmante. Como se conoce, las tecnologías tradicionales de roturación y cruce se han basado en el volteo y corte vertical del suelo, lo cual contribuye a generar numerosos efectos contraproducentes a la agricultura. Cuando los arados tradicionales vuelcan el prisma del suelo, ponen al descubierto una masa orgánica acompañada de su fecunda micro fauna. Con la inclemencia de los rayos del sol tropical, no solo se altera negativamente la materia orgánica mencionada, sino que, además, se extingue la micro población referida, creadora de nutrientes para las plantas. Además, con esa forma de laboreo se pierde la humedad superficial del suelo y aparece la compactación. Con los equipos tradicionales, la preparación de suelo equivale a la esterilización de esta. Otro efecto adverso de la inversión del prisma es el persistente crecimiento de maleza no deseada, pues lejos de desaparecer las semillas de las malezas, estas se propagan como si estuviesen impulsadas por atomizadores. A lo anterior agreguemos que, con el antiguo volteo del prisma, la maleza no logra incorporarse al suelo como materia orgánica; con el multiarado ocurre todo lo contrario, porque el corte del implemento se hace de manera horizontal, lo cual posibilita que la maleza muera en la superficie y mantenga la humedad del área.

La geometría de las herramientas de labranza es un factor decisivo para la conservación de los suelos agrícolas. Los aperos deben tener la capacidad de mantener determinado nivel de residuos de las cosechas sobre la superficie así como evitar el enterramiento de la materia orgánica, del mismo modo remover el suelo de forma localizada. De este modo es posible reducir los efectos de la erosión, la liberación del carbono y la compactación del suelo (Carter y Daniel, 2005).

La evaluación de tecnologías de labranza usando herramientas de cincel, no labranza y labranza flexible ha mostrado un incremento en los indicadores de calidad del suelo comparado a los resultados obtenidos con la labranza convencional. Los efectos indeseados de la erosión y la compactación fueron menores para las tecnologías de conservación (Barber *et al.*, 1996). Otros estudios han demostrado que la actividad del carbono es afectado principalmente por el nivel de destrucción de los agregados del suelo. Los autores concluyeron que la retención de los residuos de la cosecha decrece la descomposición del carbono orgánico lo que incrementa las propiedades agronómicas del suelo (Chivenge *et al.*, 2007).

Objeto de estudio: Simulación de operaciones de labranza.

Problema científico: No se cuenta con modelos que realicen una descripción dinámica de la interacción del suelo con aperos tipo paratill.

2

Hipótesis: Mediante el empleo del método de elementos discretos es posible simular el funcionamiento del *paratill* durante la interacción con el suelo en operaciones de labranza.

Objetivo General: Implementar un modelo para la simulación de la interacción del suelo con un implemento tipo paratill empleando el método de los elementos discretos.

Tareas de la Investigación:

- 1. Determinación de las propiedades mecánicas del suelo.
- 2. Selección y análisis de resistencia de la herramienta de corte.
- Creación de un modelo suelo-paratill mediante el método de elementos discretos.
- Interpretación de los patrones dinámicos y esfuerzos mecánicos durante la simulación de la labranza.

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 Herramientas de labranza para la conservación de suelos

La geometría de las herramientas de labranza es un factor decisivo para la conservación de los suelos agrícolas. Los aperos deben tener la capacidad de mantener los residuos de las cosechas sobre la superficie así como evitar el enterramiento de la materia orgánica, del mismo modo remover el suelo de forma localizada. De este modo es posible reducir los efectos de la erosión, la liberación del carbono y la compactación del suelo (Carter y Daniel, 2005).

La evaluación de tecnologías de labranza usando herramientas de cincel, no labranza y labranza flexible ha mostrado un incremento en los indicadores de calidad del suelo comparado a los resultados obtenidos con la labranza convencional. Los efectos indeseados de la erosión y la compactación fueron menores para las tecnologías de conservación (Barber *et al.*, 1996). Otros estudios han demostrado que la actividad del carbono es afectado principalmente por el nivel de destrucción de los agregados del suelo. Los autores concluyeron que la retención de los residuos de la cosecha decrece la descomposición del carbono orgánico lo que incrementa las propiedades agronómicas del suelo (Chivenge *et al.*, 2007).

La transición desde arados de vertedera ha herramientas verticales para la no inversión del suelo ha seguido un largo camino de modificaciones y estudio de los efectos de la labranza en la estructura del suelo así como la realización de diversos experimentos en distintos tipos y condiciones de suelo. Para introducir nuevos modelos o modificar la geometría de las herramientas existentes es imprescindible conocer las propiedades del suelo así como las particularidades agro técnicas de la plantación. En este sentido el tipo de suelo es considerado como el factor decisivo. La labranza en general afecta la distribución del suelo en las áreas destinadas a la producción agrícola, sin embargo los arados de vertedera introduce un importante nivel de translocaciones y dispersión de los constituyentes del suelo especialmente durante el trabajo en pendientes (Mouazen y Nemenyi, 1996; Morris *et al.*, 2010).

El grado de ruptura del suelo durante la labranza depende de los parámetros geométricos de la herramienta y el estado físico del suelo. Los requerimientos de fuerza de tiro así como el funcionamiento en las condiciones de trabajo fueron evaluados durante un largo período asociado a las afectaciones para el eco-sistema (Perdok y Kouwenhoven, 1994).

1.2 Estudios experimentales del comportamiento mecánico del suelo

Los estudios sobre la variabilidad de las propiedades mecánicas de los suelos muestran una marcada dependencia a factores como la estructura del suelo, la textura, la composición mineralógica, la humedad y la densidad. El comportamiento mecánico de los suelos arcillosos presenta un alto nivel de complejidad debido a la ocurrencia del endurecimiento causado por la cementación. El agua absorbida por

la arcilla mineral forma enlaces entre las partículas del suelo que incrementa la rigidez del mismo dependiendo de su composición química (Grim, 1988).

Varios procedimientos para investigar el comportamiento mecánico del suelo han sido adaptados de los ensayos clásicos de las disciplina de mecánica de suelos. La ensayos de fractura empleados en metales han sido adaptados para determinar la fractura frágil de los suelos empleando muestras de suelo arenoso y arcillosos mostrando el incremento de la resistencia relacionada al incremento dela densidad del suelo. (Aluko y Chandler, 2006). Pruebas de torsión fueron realizadas en suelos arenosos, mediante el análisis estadístico de los resultados se obtuvieron ecuaciones para predecir el grado de compactación y fricción de las diferentes muestras asociadas al contenido de humedad de las mismas (Avers, 1987).

1.3 Métodos numéricos para la simulación dinámica del suelo

La predicción de las fuerzas de tiro, la distribución de los agregados y los daños causados por la erosión durante la labranza están entre las aplicaciones de la modelación numérica en los sistemas de labranza. Pronósticos más rápidos y precisos son posibles ejecutarse con la combinación de los resultados experimentales y el conocimiento teórico usando modelos computacionales. Métodos como el análisis en elementos finitos (FEM), elementos discretos (DEM), redes neuronales artificiales (ANN) y Dinámica de fluidos computacionales (CFD) han sido usados para la simulación de los fenómenos que tienen lugar en el suelo (Karmakar y Kushwaha, 2006).

Mediante el uso de del FEM numerosos estudios se han realizado enfocados en el análisis estructural dentro del diseño de medios de labranza. Generalmente predominan los estudios realizados en dos dimensiones dirigidos a evaluar el efecto de la velocidad y la profundidad de trabajo en las componentes de la fuerza de (Mouazen y Neményi, 1999; Mootaz *et al.*, 2003; Abo-Elnor *et al.*, 2004; Sahu y Raheman, 2006; Gebregziabher *et al.*, 2007; Davoudi *et al.*, 2008).

Los métodos desarrollados para el estudio de la interacción del suelo con los aperos usando métodos continuos (Mootaz *et al.*, 2003; Abo-Elnor *et al.*, 2004; Huang *et al.*, 2004; Abbas *et al.*, 2006) y métodos de elementos discretos (Asaf *et al.*, 2007; Shmulevich *et al.*, 2007; Coetzee y Els, 2009; Peron *et al.*, 2009) han sido ampliamente usados para la reproducción de ensayos de laboratorio y experimentos de campo, de forma general en la mayoría de los resultados muestra buenos resultados en términos de la relación entre fuerza y desplazamiento.

1.4 EL Método de los Elementos Discretos (MED)

El método de los elementos discretos simula el comportamiento mecánico de un medio formado por un conjunto de partículas las cuales interaccionan entre si a través de sus puntos de contacto (Cai *et al.*, 2017; Coetzee, 2017). La disposición de las partículas dentro del conjunto global del sistema o medio es aleatoria, por lo que se puede formar medios con diferentes tamaños de partículas distribuidos a lo largo del conjunto, idealizando de este modo la naturaleza granular de los medios que usualmente se analiza y se simula mediante esta técnica numérica.

Principalmente se pueden distinguir las siguientes propiedades básicas que definen de forma global y a grandes rasgos este método de análisis numérico:

- Las partículas como elementos discretos que en su conjunto conforman el sistema complejo de partículas.
- Estos elementos distintos como también se le conoce se desplazan independientemente uno de otros e interaccionan entre sí en las zonas de contacto.
- En este método a nivel de cada partícula se hace uso de la mecánica del cuerpo rígido y los elementos discretos se consideran elementos rígidos en sí.

Desde el punto de vista geométrico dos partículas están en contacto si un solapamiento es el resultado de la colisión. La energía y el momento son disipadas como consecuencia de la naturaleza inelástica del medio (Tijskens *et al.*, 2003).

Las fuerzas que resultan de la interacción de dos partículas es gobernada por la segunda ley de Newton y se escribe como:

$$m_i \mathbf{a_i} = \mathbf{G}_i + \sum_c \mathbf{F}_{ci} \,, \tag{1}$$

$$\mathbf{I}_{i}\boldsymbol{\alpha}_{i} = \mathbf{H}_{i} + \sum_{c} \mathbf{r}_{ci} \times \mathbf{F}_{ci}, \quad i = 1 \ (N).$$
(2)

Los modelos en elementos discretos se descomponen en reacciones normales y tangenciales al contacto como se muestra en la Figura 1.1



Figura 1.1 Esquema de interacción en un modelo DEM.

Para obtener las posiciones relativas entre las partículas *i* y *j* el vector unitario normal \mathbf{n}_{ij} , y tangencial τ_{ij} se definen como:

$$\mathbf{n}_{ij} = (\mathbf{x}_{i} - \mathbf{x}_{j}) / |\mathbf{x}_{i} - \mathbf{x}_{j}|$$
(3)

$$\tau_{ij} = \mathbf{v}_{ij} / |\mathbf{v}_{ij}| \tag{4}$$

La fuerza normal incluye la acción de la rigidez normal así como el amortiguamiento viscoso y se determina por la siguiente ecuación:

$$F_n(\xi, \dot{\xi}) = k_n \xi + \gamma_n \xi$$
⁽⁵⁾

El esquema de integración del paso de tiempo se determina como:

$$\mathbf{v}_{t+\Delta t/2} = \mathbf{v}_{t-\Delta t/2} + \mathbf{a}_t \Delta t , \qquad (6)$$

$$\mathbf{X}_{t+\Delta t} = \mathbf{X}_t + \mathbf{V}_{t+\Delta t/2} \,\Delta t. \tag{7}$$

Las partículas esféricas se seleccionan basados en su bajo costo computacional, el contacto entre ellas se verifica por la siguiente relación:

$$\xi_{ij} \equiv (r_i - r_j) - || \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j || > 0$$
(8)

1.5 Investigaciones de los modelos DEM

La modelación mediante DEM posee suficientes recursos para lograr una representación geológica acertada del suelo, para ello numerosos estudios se ha desarrollado donde se ha demostrado que mediante la simulación se pueden obtener resultados considerablemente certeros respecto a la respuesta del suelo referente a la variación de sus propiedades (Ucgul et al., 2017; Zheng et al., 2017; Sun et al., 2018). El análisis de la naturaleza discontinua del suelo durante su deformación durante la modelación de un ensayo de penetración permitió establecer la influencia de los parámetros micros en la resistencia mecánica a la deformación. En este estudio los autores consideran que las dimensiones de las partículas es esencial para garantizar parámetros de fluctuación de las fuerzas razonables. La introducción de la adherencia entre partículas ha sido introducida para determinar la influencia de la fuerza de succión durante el colapso de las estructuras del suelo así como la influencia de la porosidad (S. H. Liu, 2002; Hang et al., 2017; Peng et al., 2017). Por otra parte la simulación de ensayos mecánicos en condiciones drenadas y no drenadas fue realizado con el objetivo de explicar la influencia de los parámetros micro del modelo en la respuesta macro (Thallak et al., 2002; Yin et al., 2018). LA combinación entre los métodos DEM y FEM también ha sido incluido como parte de la simulación del corte del suelo y rocas (Oñate y Rojek, 2004). El resultado de la modelación por ambos métodos ha sido comparado a través de los resultados obtenidos en la simulación del efecto del inflado de los neumáticos agrícolas en la estructura del suelo (Tadesse, 2004). Para estimar los parámetros de los modelos discretos se han propuesto metodologías basadas en ensayos de suelo (Asaf *et al.*, 2007; Vannier *et al.*, 2018). Por su parte la modelación de la interacción del suelo con el apero a sido realizada a través de herramientas de simple geometría (Shmulevich. *et al.*, 2006; Gabiri *et al.*, 2018) y sin cohesión del suelo (Obermayr *et al.*, 2011). Sin embargo la calibración de la respuesta del suelo como función de la fricción a la cohesión ha sido tratada en la modelación del derrumbe del suelo en condiciones de alta humedad por Utili and Nova.

1.6 Labranza sin inversión del el prisma

El multiarado

El multiarado constituye un nuevo concepto de labranza: es un implemento versátil, pues puede realizar labores de preparación de suelos y cultivo, tales como: rotura, cruce, surcado, subsolado, cultivo de deshierbe, cultivo con aporque, cultivo y fertilización, etc., sustituyendo a varios implementos de labranza y cultivo. Para ello posee un conjunto de accesorios que le permite adoptar diferentes configuraciones de trabajo, en dependencia de la labor. Es ecológico, ya que realiza el laboreo de los suelos mediante el corte vertical-horizontal, o sea, sin invertir la capa superficial, que es la más fértil. Sus ventajas económicas radican en que logra un mayor ancho de trabajo con la misma fuerza traccional que un arado común de discos.

Puede ser empleado en diferentes condiciones topográficas y en todo tipo de suelos (excepto en suelos pedregosos), con alto grado de compactación y amplios rangos de humedad. Se puede utilizar en cualquier cultivo. Reduce la erosión, pues al no voltear la capa del suelo, deja los rastrojos sobre la superficie; Reduce la

propagación de malas hierbas, por lo que disminuye el uso de herbicidas; Favorece el desarrollo de las raíces del cultivo; Ahorra agua porque retiene la humedad en el suelo; Conserva la materia orgánica y por tanto ahorra fertilizantes; Combate la compactación facilitando la infiltración y el drenaje; Deja el terreno nivelado, poroso y mullido; Con un solo equipo se pueden hacer varias labores; Reduce la cantidad de pases; Disminuye los gastos generales de explotación, especialmente combustible, piezas y salarios.

> El paratill

El Paratill descompacta el suelo sin destruir su estructura, simplemente lo remueve logrando en mayor medida que no se alteren sus propiedades. Este apero posee un brazo o soporte con un ángulo de inclinación de 45 grados con respecto a la horizontal que le posibilita levantar suavemente el suelo y fracturarlo a lo largo de sus planos naturales de falla, dejándolo caer ya mullido en la posición original. El levantamiento suave del suelo permite no mezclar la capa superficial con el subsuelo, crear terrones, o enterrar los residuos de cosechas anteriores lo cual es de gran importancia para la labranza conservacionista del suelo (Bigham & Brothers Co, 2008). Esto mejora además la infiltración y absorción del agua, estimula el desarrollo de las raíces y permite la colocación de fertilizantes en zonas más profundas.

Dentro de la concepción de los aperos se ha tenido en cuenta también el fenómeno del desgaste de sus elementos estructurales para lo cual se le ha concebido la colocación de elementos de recambio que protegen las principales partes del órgano de trabajo que entran en contacto con el suelo y se exponen al desgaste abrasivo (Herrera *et al.*, 2008). Las ventajas que posee este nuevo apero se resumen en la tabla 1.1.

	Tabla 1.1.	Ventajas	de los órg	ganos de	trabajo ti	po Paratill.
--	------------	----------	------------	----------	------------	--------------

Acción	Beneficio					
La superficie del suelo es	Posibilidad de realizar la siembra directa;					
cortada y levantada en forma tal	No se requieren labores de cultivo posteriores para					
que queda nivelada.						
	la nivelación del suelo;					
	La re compactación del suelo queda abolida.					
Se mantiene la cobertura del	Se mejora la infiltración del suelo;					
suelo por la mantanción de los						
	Se disminuye la erosión del viento y del agua;					
residuos de cosecha.						
	El subsuelo no se mezcla con el suelo de los					
	horizontes superiores del suelo;					
	La capa superficial de suelo que contiene la materia					
	orgánica no es mezclada.					
El grado de descompactación	Reducción del consumo de combustible:					
del suelo es optimizado a través	Mantenimiento de los surcos durante la labor					
de todo el perfil del suelo.						

El suelo es descompactado a lo	Bajo	requerimier	nto de	e energía.
largo de los planos de falla	No invers	ión del prisma	a del suelo.	
naturales del suelo.				
Los órganos de trabajo son	Efectiva	descompactac	ión para un	amplio rango de
regulables.	tipos de	e suelos y	condición	de humedad;
	Elevada	productividad.		
El implemento es	Requerin	nientos mínimo	os de mante	enimiento;
operacionalmente atractivo.	Protección contra el desgaste abrasivo.			
	Fácil regu	ulación de can	npo.	

Por su parte los suelos cambian mucho de un lugar a otro. La composición química y la estructura física del suelo en un lugar dado, están determinadas por el tipo de material geológico del que se origina, por la cubierta vegetal, por la cantidad de tiempo en que ha actuado la meteorización, por la topografía y por los cambios artificiales resultantes de las actividades humanas.

Las variaciones del suelo en la naturaleza son graduales, excepto las derivadas de desastres naturales. Sin embargo, el cultivo de la tierra priva al suelo de su cubierta vegetal y de mucha de su protección contra la erosión del agua y del viento, por lo que estos cambios pueden ser más rápidos. Los agricultores han tenido que desarrollar métodos para prevenir la alteración perjudicial del suelo debida al cultivo excesivo y para reconstruir suelos que ya han sido alterados con graves daños.

1.7 Principales teorías sobre la falla de los suelos

Para representar el estado tensional en determinado punto del suelo es comúnmente aceptada la teoría del estado de equilibrio límite. Este método es solamente útil para obtener información sobre sobre el valor máximos de las fuerzas antes de que el suelo sea (Shen y Kushwaha, 1998). Esta teoría tiene como principal asunción que el suelo se comporta como un material rígido, de esta forma la falla ocurre en la interface suelo-suelo o suelo-muro. El patrón de fractura está predeterminado según las fuerzas que interactúan en las superficie del suelo, estas están gobernadas por la ecuación de Mohr-Coulomb descrita en Coulomb (1776) y citada por Lambe (1969):

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \tag{9}$$

Donde:

 τ = tensión de falla [Pa],

c = cohesión [Pa],

 σ_n =presión normal [Pa],

 $tan\phi = Angulo de fricción [°].$

El criterio de Mohr-Coulomb es además usado para determinar el límite de la fuerza de corte en la interface suelo-apero usando los parámetros referentes al área de contacto.

$$\tau = c_a + \sigma_n \tan \delta \tag{10}$$

Donde:

 $\sigma_n =$ Ángulo de fricción externa [°].

Mediante el círculo de Mohrse logra una representación gráfica de los del estado tensional de suelo en el espacio normal y cortante (Figura 1.2).



Figura 1. 2 Mohr-Coulomb Criterio de falla.

La línea recta obtenida de la combinación de las tensiones principales es conocida como la superficie de falla mediante la cual se puede medir el ángulo de fricción (ϕ) respecto al eje horizontal, de la intercepción con el eje vertical resulta la cohesión (*c*).

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Determinación de las propiedades físicas del suelo

La muestra de suelo se obtuvo en áreas comúnmente utilizadas para la producción cañera ubicadas en el norte de la provincia de Villa Clara, región central de la Isla de Cuba. El suelo en el momento de tomar la muestra tenía un año de descanso después de cinco años de uso en plantaciones de caña de azúcar. Cuatro puntos fueron seleccionados en diagonal tomados en una hectárea a tres profundidades diferentes: 15, 30 y 50 cm. La textura y propiedades físicas mostradas en la tabla 1 fueron obtenidas por la combinación de tamiz y pruebas de hidrómetro según (Archer y Marks, 1985). El suelo fue clasificado como un Vertisol de acuerdo a la clasificación internacional de la FAO. La importancia económica de este suelo se soporta en su relación directa con la industria azucarera la cual tiene gran impacto social y de desarrollo en Cuba, Su importancia radica en el hecho de que el 40% de las plantaciones de caña de azúcar crece en suelos arcillosos (Suelos, 1975).

Tabla 2.1. Propiedades físicas del suelo.

Depth, cm	Gs	PL	LL	PI	Sand	Silt	Clay
15	2.61	24.5	63.5	44.9	7	27	66
30	2.64	28.6	78.9	50.3	б	29	бб
50	2.62	17.2	67.9	50.7	8	29	63

Una de las principales características de este suelo es la similitud entre el horizonte A y B. El color rojo-grisoso es resultado del contenido de roca calcárea, cuanta con un alto contenido de arcilla expansiva o montmorillonita lo cual lo hace propenso a formar grietas profundas en las estaciones secas del año (Figura 2.1). Sin embargo, bajo régimen de riego se comporta con gran friabilidad, debido a su alta fertilidad y microbiológicos se clasifican como los mejores suelos para usos agrícolas.



Figura 2.1 Clasificación de los suelos según el contenido de arcilla, arena y limo.

Dado que las pruebas de laboratorio, las operación de labranza a nivel de canal y la simulación se realizan en el primer horizonte de suelo (hasta 15 cm), los estudios en lo adelante se centran en la determinación de las propiedades mecánicas relacionadas con esta capa del suelo.

2.2 Metodología del ensayo de compresión triaxial

Las propiedades mecánicas del suelo referentes a la interacción suelo-suelo de la capa superior fueron determinadas por ensayos de compresión triaxial, comúnmente utilizados en las investigaciones de ingeniería civil y aplicaciones

agrícolas. Para capturar la variación de las condiciones físicas del suelo en función de su humedad y densidad se siguió un diseño experimental de tipo factorial a múltiples niveles donde se establecieron como variables dependientes: la resistencia al corte, el ángulo de fricción interna, la cohesión del suelo, la adherencia y el módulo de Young.

El contenido de humedad (*u*) se varió en cinco niveles: (16, 20, 24, 28 y 32%). La densidad (δ) por su parte se varió en tres niveles: (1, 1,2 y 1,4 g/cm3). Sin embargo, la humedad y la densidad final de los experimentos varían ligeramente respecto a lo planificado. Como resultado se obtienen quince puntos experimentales a partir de la combinación anterior, cada uno de ellos se repite en cuatro diferentes presiones axiales obteniendo un total de 60 experimentos.

El contenido de humedad se calcula de acuerdo al siguiente procedimiento. Se mide la masa de la muestra de suelo húmedo, luego es secado en un horno por 12 horas a una temperatura de 110°C y finalmente se toma el peso seco (ASTM 2216-92). Los valores buscados de la humedad se obtienen mediante la formulación siguiente expresada como en porcentaje del peso seco de la muestra:

$$u = \frac{m_{wet} - m_{dry}}{m_{dry}} \cdot 100 \tag{11}$$

Donde:

 m_{wet} : masas de la muestra antes del secado en el horno.

*m*_{dry}: masas de la muestra después del secado en el horno.

La muestra de suelo (Figura 2.2) se obtiene por el mezclado y conformado del horizonte superior hasta obtener un cuerpo cilíndrico de 50 mm de diámetro por una altura de 100 mm. La representación esquemática de la instalación de prueba se muestra en la figura 2.2, Para el ensayo el espécimen de suelo se cubre por una membrana de goma es confinado en un recipiente hermético cilíndrico lleno de agua destilada como muestra la figura 2.2.



Figure 1 triaxial compression testing device

Figura 2.2. Esquema del aparato de compresión triaxial.

Cuatro muestras con el mismo contenido de humedad y densidad se ensayaron modificando las presiones radiales a 30, 50, 70 y 90 kPa, obteniéndose de este modo cuatro tensiones axiales diferentes para cada combinación experimental. La fuerza de tensión principal se obtiene durante el ensayo presionando por la parte superior del cilindro a una velocidad constante de 1 mm/min. La carga se detiene cuando el esfuerzo desviador ha llegado al máximo y luego decrece un 20%.

El esfuerzo desviador después de contar con los datos experimentales se calcula como la diferencia entre las tensiones principales mayor y menor en los ensayos de compresión triaxiales (σ 1 - σ 3), La tensión principal mayor σ 1 en la muestra es igual al esfuerzo desviador más la presión de la cámara, y la tensión principal menor σ 3 en la muestra es igual a la presión de la cámara.

Para calcular el esfuerzo desviador (σ 1 - σ 3) la carga vertical en la muestra se obtiene directamente del transductor de fuerza:

$$(\sigma 1 - \sigma 3) = P / Ac \tag{12}$$

Donde:

P: carga aplicada axial, N.

Ac: Area corregida transversal de la muestra, m²

Para corregir el área de la sección transversal (A₀), para cada medida, se aplica la siguiente relación:

$$Ac = A_0/1 - \varepsilon$$
 (13)

Donde (ϵ) es la deformación axial y determina como:

$$\varepsilon = \Delta L/L_0 \tag{14}$$

Donde:

 Δ L: cambio en la longitud de la muestra, mm.

L₀: longitud inicial de la muestra antes de la carga, mm.

Realizando el gráfico de la relación entre el esfuerzo desviador y la deformación axial, tomando el esfuerzo desviador en las ordenadas y la deformación axial en las abscisa, se determinan la tensión máxima de falla ($\sigma 3 - \sigma 1$) obtenidas para las cuatro presiones de confinado. De este modo se obtiene el plano de tensión de corte a partir del criterio de superficie de falla cónica de Mohr-Coulomb el cual se utiliza para determinar el ángulo de fricción del suelo y la cohesión.

2.3 Metodología para la calibración del modelo virtual

Para la calibración del modelo se determinó la influencia de tamaños de las partículas en la respuesta mecánica del modelo por medio de la simulación del ensayo de compresión triaxial (Figura: 3.8). El mismo se realizó empleando partículas esféricas con radio de 0,6, 2,5 y 3,2 mm formando una probeta cilíndrica de 50 mm de diámetro y 100 mm de altura.

La relación entre los valores microscópicos del modelo y macroscópicos de la fricción del suelo se obtuvo simulando con valores constantes de los demás parámetros varios ángulos de micro-fricción. Se emplearon valores en el siguiente rango: 3,8, 4,6, 5,4, 6,2 ° y luego se trazó la curva entre tensión tangencial y presión normal empleando los valores máximos de la fuerza alcanzado en cada ensayo. Se realizaron un total de dieciséis simulaciones, ejecutando cada ensayo para valores de 30, 50, 70, 90 KPa de presión normal.

2.4 Metodología para el ensayo de corte directo modificado

El ensayo de corte directo es un experimento que se basa en deformar la muestra a una velocidad constante en un plano de corte determinado por la configuración del aparato a diferentes presiones normales. La modificación realizada consiste en hacer deslizar el suelo por una superficie de acero para determinar el ángulo de fricción externa y la adherencia del mismo. La modificación consiste en introducir en la cavidad media superior cilíndrica una muestra de acero, garantizando el contacto durante el experimento. (Sánchez-Girón Renedo, 1999).

Este experimento es utilizado para la determinación de las propiedades referentes a la interface suelo-metal y constituye el método para reproducir los fenómenos que ocurren durante la interacción del suelo y la superficie de acero del apero durante la operación de labranza.

Las muestras de suelo fueron remoldeadas para la prueba de corte directo en un aparato estándar de corte directo (Figura 2.3). Las dimensiones de las muestras fueron de 70 mm de diámetro y 16 mm de altura. La muestra de metal y de suelo se colocó en los anillos cilíndricos que conforman el cuadro principal. Para determinar la influencia del contenido de agua y la densidad en la adherencia del suelo y la fricción durante el contacto con el acero se realizan los experimentos siguiendo el mismo diseño factorial explicado en el epígrafe anterior.

Tomando cuatro muestras y realizando su preparación con contenido de humedad y densidad similares se someten a las pruebas de corte directo con cargas normal a 30, 50, 70 y 90 kPa. Los quince puntos experimentales se prueban siguiendo el mismo procedimiento. La velocidad se mantiene constante a 1 mm/min la cual se le aplica a la mitad inferior para hacerla deslizar garantizando las condiciones de drenaje. Los datos del desplazamiento relativo de las cajas de corte respecto a la fuerza de cizallamiento se compilan durante el tiempo de deslizamiento para trazar la curva cortante-desplazamiento correspondiente. El ensayo se termina cuando el desplazamiento alcanza el 20% del diámetro de la muestra. El estrés durante el cizallamiento se obtiene por la relación entre la fuerza nominal cortante, y el área de la muestra.

2.4 Modelo matemático de interacción suelo-apero

Para describir la interacción entre partículas cohesivas fue implementado explícitamente un modelo el cual se divide en dos modelos de contacto que considera la interacción entre partículas de suelo y entre estas y el medio de labranza. Para ello se introdujeron las propiedades evaluadas del suelo anteriormente en las formulaciones que además consideraron el efecto de la adherencia y la fricción sobre la resultante.

Los enlaces entre por la acción de la fuerza cohesiva son creados por la combinación del efecto de la micro-cohesión y la micro-fricción las cuales son activadas en direcciones normal y tangencial respectivamente de acuerdo al criterio de falla de Mohr-Coulomb:

$$Ft^{max} < F_n \cdot ta \, n(\phi_\mu) + c_\mu \tag{15}$$

Donde:

 F_t^{max} = límite tangencial [N],

 F_n = fuerza normal [N],

 ϕ_{μ} = ángulo de micro-fricción [N],

$$c_{\mu}$$
 = micro-cohesión [N].

La variación de la fuerza normal se determina como:

$$\Delta F_n = k_n \cdot u_n + \eta_n (u_n / \Delta t) \tag{16}$$

Donde:

 k_n = rigidez normal [N/m],

 u_n = desplazamiento normal [mm],

 η_n = coeficiente de viscosidad [kg/s],

 Δt = paso de tiempo [s].

La rigidez normal es calculada a través del modelo propuesto por Liao (1997):

$$k_n = \frac{E_{ab} \cdot A_{int}}{D_{eq}} \left[\frac{1 + \alpha_k}{\beta_k (1 + \nu) + \gamma_k (1 - \alpha_k)} \right]$$
(17)

Donde:

 E_{ab} = Modulo de Young [Pa],

Aint= Superficie interna [m²],

Deq = distancia equivalente [m],

v = coeficiente de Posición [],

 α_{k} ,= recorrido de carga [],

 β_{k} , = factor de ablandamiento [],

 γ_k = rango de interacción [].

De forma similar la variación de la fuerza tangencial se determina como:

$$\Delta F_s = k_s \cdot \Delta u_s + \eta_s (\Delta u_s / \Delta t) \tag{18}$$

Donde:

 k_s = rigidez tangencial [N/m],

 $\Delta u_{\rm s}$ =solapamiento tangencial [m],

 η_s = viscosidad tangencial [kg/s].

2.5 Configuración del bloque de suelo

Para la realización del trabajo se diseñó un bloque de suelo de que posee cinco caras con las siguientes dimensiones por eje de las (x) 0,25m, (y) 0,13my (z) 0,1m. Posee además un volumen Surface de tipo physical. La densidad del solido es de 2500Kg/m3 y una posición del radio de 0,25 como se muestra en la fig.2.3 a continuación.



Figura 2.3. Dimensiones del bloque de suelo, medidas en mm.

Para el modelo de suelo se empleó la partícula esférica de radio 2 mm (Figura 2.4) con masa de 8,37758e-05 Kg, volumen de 3,35103e-08 m³, momento de inercia (X) 1,34041e-10 Kg/m², momento de inercia (Y) 1,34041e-10 Kg/m², momento de inercia. (Z) 1,34041e-10 Kg/m. La misma partícula se emplea en el modelo 2 con una distribución al azar de radios entre 0.2 y 2mm.



Figura 2.4. Partículas empleadas en el modelo de suelo.

Para el segundo experimento se forma el bloque de suelo con partículas combinadas las cuales una posee un radio de 2 mm con una posición (x) de 5 mm

y (y) y (z) de 0 una masa de 8,37758e-05 Kg, un volumen de 3,35103e-08 m³, un momento de inercia (x) de 1,34041e-10 Kg/m², (y) de 1,34041e-10 Kg/m² y (z) de 1,34041e-10 Kg/m² como se muestra en la figura (2.4).

2.5 Descripción del órgano de trabajo

Para modelar el cultivo se diseñó una herramienta de labranza de tipo paratill la cual se muestra en la Figura 2.5, la cual se hace pasar a través del bloque de suelo. Las propiedades del suelo simuladas responden a las condiciones de suelo seco y no cohesivo.



Figura 2.5 Implemento virtual tipo paratill.

2.5 Metodología para verificar la precisión del modelo

Para realizar la verificación analítica del modelo propuesto se analizaron los modelos semi-empiricos usados para predecir la respuesta del suelo (Payne, 1956; Hettaratchi y Reece, 1967; McKyes y Ali, 1977; Perumpral *et al.*, 1983; Swick y Perumpral, 1988).

El modelo Perumpral-Grisso-Desai fue seleccionado dado la similitud de los parámetros utilizados en el mismo con los estudiados en el suelo así como su comprobada valides para suelos cohesivos, en el mismo la fuerza de tiro se determina mediante la siguiente ecuación:

$$D = w_t \left(\gamma z^2 N_\gamma + c z N_c + c_a z N_a \right) \tag{19}$$

Donde:

D = fuerza de tiro [N],

 w_t = ancho del apero [mm],

 $\gamma = \text{densidad } [g/\text{cm}^3],$

z = profundidad [mm],

c = cohesión [Pa],

 c_a = adherencia [Pa],

 $N\gamma$, N_c , N_a = coeficientes [].

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Propiedades mecánicas del suelo

3.1.1 Curva de tensión-deformación

Las tensiones máximas obtenidas en los ensayos triaxiales se alcanzaron cuando el contenido de humedad es mínimo en las nuestra de suelo (Figura 3.1). La curva de tensión-deformación muestra la forma típica del comportamiento de los materiales frágiles.





deformación plástica para niveles altos de humedad del suelo es lo más característico en estos casos, haciendo difícil definir el punto de falla del suelo. Para todas las combinaciones de humedad el suelo presentó valores altos de resistencia en comparación con suelos limosos y arenosos (McKyes y Maswaure, 1997). Estudios llevados a cabo en un suelo Ferrasol con el 32% de arcilla (Suárez et al., 2008) reportaron valores de resistencia al corte alrededor de 15% menores en el punto de falla, sin embargo, el patrón resultó ser el mismo.

3.1.2 Resistencia cortante del suelo

Los resultados de la resistencia del suelo calculada a presión axial de 50 kPa mediante el ensayo triaxial de compresión muestran un incremento considerable cuando disminuye la humedad del suelo para todos los niveles de densidades estudiadas (figura: 3.2),



Figura: 3.2 Variación de tensión cortante a presión axial igual a 50kPa.

Como muestra la figura para el suelo compactado el incremento es mayor cuando disminuye la humedad mostrando una mayor linealidad con respecto a esta; no obstante, Los valores máximos de tensión alcanzan los 1,000 kPa para condiciones secas con suelo endurecido, con el aumento de la humedad y el descenso de la densidad estas alcanzan solo 150 kPa. Este comportamiento puede ser resultado de que el agua para valores de humedad mayor a 25% puede actuar en el suelo como una capa lubricante que facilita la disolución de los enlaces entre las partículas.

El modelo estadístico que describe el comportamiento de la resistencia al corte del suelo a presión axial de 50 kPa (τ_{50}) muestra la siguiente forma:

$$\tau_{50} = \mathbf{a} \, u + \mathbf{b} \, \rho + \mathbf{c}^* \, u^2 + \mathbf{d}^* \, \mathbf{u}^* \rho \tag{20}$$

Los coeficientes que satisfacen el modelo para unos límites de confianza del 95% son los siguientes:

b = 1706 (1410, 2001)

c = 1.098 (0.4484, 1.748)

Estadística del ajuste:

Error estándar (SSE): 1.191e 004

R-cuadrado: 0,98

R-cuadrado ajustado: 0,98

Media del error estándar: RMSE: 32,91

3.1.3 Comportamiento del módulo de Young

El módulo de Young caracteriza la propiedad elástica del suelo, y brinda el criterio acerca de si el mismo puede volver a su tamaño original después de ser traccionado o comprimido. El módulo elástico se puede calcular como la relación de tensión y el desplazamiento. Sin embargo los suelos en general no muestran una curva de tensión lineal. La pendiente de la línea secante trazada desde el origen hasta un punto en la curva donde se inicia la deformación plástica es el criterio adoptado para el cálculo del módulo elástico (E).

Esta propiedad exhibe una gran relación con el contenido de agua y también con la densidad del suelo como se muestra en la Figura: 3.3. Resultados obtenidos a partir del estudios en tres tipos de suelos diferentes (Kézdi, 1980), mostraron el mismo patrón, donde la elasticidad crece de forma lineal respecto a la humedad.



Figura 3.3. Módulo de elasticidad respecto a la humedad y densidad.

Para todas las densidades el módulo E muestran el mismo patrón de comportamiento. El mismo muestra un aumento sostenido hasta alcanzar valores de 95 MPa para el suelo seco y compacto. Para valore máximos de humedad y baja densidad esta propiedad solo alcanza valores de 15 MPa, incidiendo en ello la alta porosidad que constituye una fuente de amortiguación que propicia el comportamiento plástico.

La relación estadística obtenida como expresión de la previsible del comportamiento del Módulo Elástico respecto a la humedad y la densidad es la siguiente:

$$\mathbf{E} = \mathbf{a} + \mathbf{b}\boldsymbol{\mu}\boldsymbol{\rho} + \mathbf{c}\,\boldsymbol{\rho}^{\,2} \tag{21}$$

Los coeficientes obtenidos con límites de confianza del 95% son:

c = 57.19 (49.42, 64.96)

Estadísticas del ajuste:

SSE: 210,4 R-cuadrado: 0,96 R-cuadrado ajustado: 0,95 RMSE: 4.187

3.1.4 Comportamiento de la cohesión del suelo

La cohesión del suelo, obtenido por medio del ensayo de compresión triaxial muestra una fuerte dependencia con ambos factores (Figura: 3.4), el incremento en la densidad hace crecer de forma cuadrada la cohesión del mismo, asimismo a medida de que aumenta la humedad esta propiedad decrece hasta alcanzar valores de 25 kPa, el efecto de la cementación causada por el alto contenido de arcilla se refleja en los valores obtenidos para valores altos de compactación donde se alcanzan 130 kPa.



Figura: 3.4. Resultados de la cohesión del suelo.

Para muestras inferiores a 1.2 g/cm³ de densidad la cohesión un incremento lento, por encima de este valor es ligeramente mayor denotado la reducción de la plasticidad del mismo al alcanzar la porosidad. Resultados similares se obtuvieron en suelos arcillosos (McKyes et al, 1994; Zhang et al, 1986), donde la humedad crítica de compactación es función de la densidad del suelo. Otros estudios realizados en suelos arenosos (Mouazen et al., 2002) mostraron también la variación en forma lineal de la cohesión respecto al contenido de humedad y no linealmente con la densidad.

La ecuaciones estadística del análisis de regresión para predecir la cohesión se escriben como:

$$\mathbf{c} = \mathbf{a} + \mathbf{b}\boldsymbol{\mu}\boldsymbol{\rho} + \mathbf{d}\boldsymbol{\rho}^2 + \mathbf{e}\boldsymbol{\rho} \tag{22}$$

Los coeficientes para límites de confianza del 95% son:

a = 220.7 (-16.41, 457.7)

b = -2.709(-3.126, -2.292)

d = 211 (39.68, 382.4)

e = -317.1 (-723.3, 89.08

Estadísticas del ajuste:

SSE: 238,6

R-cuadrado: 0,9745

R-cuadrado ajustado: 0,9676

RMSE: 4.657

3.1.5 Comportamiento de adhesión del suelo

Los suelos arcillosos generalmente son más propensos a adherirse a la superficie del apero, esta propiedad conocida como adherencia se determinó mediante el corte directo modificado explicado en las metodologías. Es conocido que el agua en la interface suelo-metal forma una película que ayuda al deslizamiento del suelo, sin embargo para valores dentro de 24-30% la misma manifiesta un crecimiento sustancial de la adherencia (Figura: 3.5).La densidad por su parte tiene un papel secundario respecto al comportamiento de la adherencia, mostrando un ligero incremento lineal con el aumento de la misma.



Figura: 3.5 Comportamiento de la adherencia del suelo.

La ecuación estadística de regresión múltiple para predecir la adhesión del suelo se escribe como:

$$ca = \mathbf{a} \ \rho + \mathbf{b} \ u^2 \tag{23}$$

Los coeficientes para límites de confianza del 95% son:

Estadística del ajuste:

SSE: 2.067 R-cuadrado: 0,9719 R-cuadrado ajustado: 0,9698 RMSE: 0,3988

3.1.6 Fricción interna y externa del suelo

El ángulo de fricción interna del suelo tiende a alcanzar el valor máximo para el suelo con alta densidad. La humedad por su parte afecta esta propiedad aumentándola ligeramente. Resultados similares fueron encontrados en suelos limosos (Yao y D.Zeng., 1988). Sin embargo, otros autores no encontraron relación entre la fricción interna del suelo y la densidad aparente (McKyes et al, 1994; Mouazen et al, 2002.



Figura: 3.6 Comportamiento de la fricción interna del suelo.

Las relaciones para la predicción de ángulos de fricción del suelo fueron escritas como:

$$\phi = \mathbf{a}\rho + \mathbf{b}u^2 + \mathbf{c} \tag{24}$$

Los coeficientes para límites de confianza del 95% son:

a = 16.67 (13.47, 19.86)

b = -0.007976 (-0.0098, -0.006152)

c = 6.204 (2.232, 10.17)

Estadística del ajuste:

SSE: 8.1

R-square: 0.9489

Adjusted R-square: 0.9404

RMSE: 0.8216

Por su parte la fricción externa del suelo respecto al acero se determinó por medio del ensayo modificado de corte directo de metal. El mismo muestra una dependencia sustancial al contenido de humedad del suelo, aumentando de forma cuadrática hasta un valor máximo de 17º para el valor mínimo de humedad (Figura: 3.7). Por su parte con el aumento de la densidad solo se registra un crecimiento discreto y lineal de esta propiedad.



Figura 3.7 Relación entre la fricción, densidad y contenido de agua.

Las relaciones para la predicción de ángulos de fricción del suelo fueron escritas como:

$$\delta = \mathbf{a} + \mathbf{b}\rho + cu^2 \tag{25}$$

Los coeficientes para límites de confianza del 95% son:

a = 15.88 (13.05, 18.7)

b = 3.029 (0.7592, 5.299)

c = -0.008523 (-0.009818, -0.007227)

Estadística del ajuste:

SSE: 4.088

R-square: 0.9471

Adjusted R-square: 0.9383

RMSE: 0.5836

3.2 Resultados de la calibración del modelo virtual

Como resultado de la disminución del radio de las partículas en la simulación del ensayo triaxial disminuye el efecto de la oscilación vertical de la fuerza. Para las partículas de menores dimensiones el proceso se hace más uniforme Figura: (3.9)



Figura 3.8. Simulación del ensayo de compresión triaxial.

Sin embargo aumenta considerablemente el tiempo de computacional necesario para calcular un mayor número de contactos, asimismo para mantener la estabilidad numérica se necesita además reducir el espacio de tiempo lo que hace más lenta la simulación.



Figura: 3.9. Fuerzas resultantes para diferentes radios de partículas.

Finalmente se adopta el radio de 2.5 mm para realizar los ensayos subsiguientes a partir de considerar los valores de dispersión adecuados y de ese modo mantener en valores mínimos el tiempo de cómputo.



Figura 3.10. Resultado del ensayo de corte directo simulado.

Como se muestra en la figura 3.11, al aumentar la presión, un nuevo valor de resistencia a la fuerza cortante se alcanza, la distribución de los resultados por cada valor de micro-fricción empleada en la figura 3.11 donde se aprecia una relación lineal entre la micro-fricción y las tensiones cortantes.



Figura: 3.11 Resultados de las tensiones cortantes para diferentes valores de micro-fricción.

Del mismo modo se determinó el ángulo de fricción interna el cual se obtiene como la pendiente de la líneas que une cada uno de los valores obtenidos en la simulación a diferentes valores de micro-fricción (Figura:3.12).



Figura: 3.12 Relación entre la fricción interna y la micro-fricción.

La relación empírica obtenida del análisis de regresión lineal entre la fricción interna y micro-fricción se expresa en ecuación siguiente:

$$\phi \mu = (\phi + \mathbf{a}) / \mathbf{b} \tag{26}$$

3.3 Influencia de las dimensiones de las partículas sobre la fuerza de tiro

Para la determinación de la influencia en la variación de la fuerza de tiro durante la simulación de la interacción del suelo con la herramienta de labranza se realizó un experimentó donde se evaluaron tres radios de partículas r = 5, 7 y 9 mm, se confirmó además un bloque de suelo de 40x50x130 mm (Figura 3.13).



Figura 3.13. Bloques de Suelo a diferentes radios de partículas.

Las curvas obtenidas de fuerza versus desplazamiento se muestran en la Figura 3.14. Como se puede apreciar la fluctuación de las fuerza resultante incrementa con el radio sin embargo la magnitud de las mismas no sufre cambios significativos.



Figura 3.14 Curvas de fuerzas durante la interacción suelo-apero simple.

El resultado que se muestra en la Figura 3.14 se aprecia que la variación del radio no ejerce una influencia en la magnitud promedio de la fuerza de tiro, pero si se aprecia una marcada alteración en la desviación estándar lo que amplifica el efecto oscilatorio de la fuerza.

3.4 Verificación analítica del modelo

Los parámetros del modelo fueron trasladados a una secuencia de la simulación de la interacción del suelo con la herramienta simple y a través de la ecuación se determinó el valor de la fuerza de tiro como se muestra en la Figura 3.15.



Figure 3.15 Parámetros del modelo empíricos.

Los resultados obtenidos mostraron que el mediante el modelo Perumpral-Grisso-Desai la fuerza calculada es de 88.2 N para un valor de 97.3 N obtenido durante la simulación estos valores muestran una diferencia de un 10.3% lo que se es aceptable considerando la constante variación de los ángulos que tiene lugar debido al movimiento de las partículas durante la simulación así como la variación de la altura del suelo frente a la herramienta. Por otra parte los resultados de los modelos empíricos se enmarcan de un 60 a 80% de precisión (Shen y Kushwaha, 1998). Es de considerar además que los modelos DEM muestran cierta tendencia a sobre estimar los valores de las fuerzas (Obermayr *et al.*, 2011).

3.5 Generación del bloque de suelo

Siguiendo el procedimiento descrito en el epígrafe 2.4 se obtuvieron tres bloques de suelo los cuales fueron llenados a partir de la generación de partículas con un total de 15 000, 20 000 y 15 000 para las tres variantes definidas (P1, P2 y P3). Como se muestra en la Fig 7 las partículas se crean en la cara superior del prisma donde mediante el método *Factory Plane* definido en EDEM, la posición de aparición se hace siguiendo un orden aleatorio lo que posibilita el llenado de cada parte del cuerpo del prisma de forma regular y sin definir patrones, las partículas caen por efecto de la gravedad y al hacer contacto se activan las fuerzas de cohesión definidas en el modelo.



Figura 3.16. Generación de las partículas de suelo.

La figura 3.17 muestra la distribución de la Energía Cinética durante el procedimiento de llenado, en la misma se muestra el incremento de la energía durante la caída libre de las partículas hasta alcanzar los valores mínimos de equilibrio en reposo.



Figura 3.17. Energía cinética durante la caída de las partículas de suelo.

3.6 Análisis de la rigidez de la herramienta

Para establecer el diseño del apero empleado se realizaron los correspondientes análisis de resistencia empleando para ello el método de los Elementos Finitos. Como se muestra en la siguiente figura 3.18. Se establecieron restricciones en la base de la herramienta y en la superficie lateral de la misma las que corresponden a la fijación de esta al bastidor del arado. Las fuerzas por su parte se aplicaron en la superficie frontal a lo largo del filo donde tiene lugar la interacción del suelo con la misma.



Figura 3.18. Estudio del apero por el Método de Elementos Finitos.

Como se nuestra en los resultados la distribución de esfuerzos Von Mises los valores máximos se encuentran en la superficie curva del implemento, sin embargo

estas son considerablemente menores al coeficiente de seguridad del material, las demás secciones no presentan valores significativos.

El análisis del desplazamiento mostró valores solo de0.01 mm correspondientes a la punta de la herramienta, dicha deformación decrece de forma uniforme a medida que se acerca a la fijación. De tal modo se considera que el diseño propuesto cumple con las exigencias estructurales a partir del empleo del material y las solicitaciones de la interacción con el suelo.

3.7 Análisis del patrón de velocidad de las partículas

Como se muestra en la Figura 3.19 las partículas de suelo se mueven en correspondencia a las principales zonas de presión dentro del bloque, producto al impacto y el arrastre que provoca la herramienta las mismas aumentan su velocidad hasta valores máximos de 7mm/s para las que están directamente en contacto con el apero, se muestra además que un considerable número de estas se desplazan sobre el suelo lo que denota el considerable incremento de la energía específica.



Figura 3.19. Análisis de la velocidad de las partículas.

3.8 Resultados de la velocidad y la fuerza de tiro

Como se conoce, la componente principal durante las operaciones de labranza es la fuerza de tiro la cual actúa en sentido contrario al movimiento del apero, mediante la simulación es posible la determinación de la misma y su variación en función de las condiciones del suelo así como el diseño del implemento. En el análisis de los casos de estudio se valoran además componentes como la presión sobre el suelo y la energía del proceso. Como se muestra en la Fig 3.20 la fuerza de tiro incrementa a partir del contacto de la herramienta con el bloque de suelo, la oscilación de los valores responde a los diferentes contactos que se establecen durante el proceso. El valor promedio (línea azul) de la fuerza en este sentido define la demanda traccional del implemento y está relacionada directamente a la cohesión del suelo.



Figura 3.20. Gráfico de fuerza total contra el tiempo.

Los valores que se obtuvieron de las componentes transversales (Fig 12) muestra el equilibrio tensional que predomina en ambos sentidos del implemento.



Figura 3.21. Gráfico de fuerza total.

3.9 Análisis de la variación de la energía cinética

La energía cinética tanto de las partículas de suelo como del implemento varían considerablemente durante todo el proceso en función de las fuerza y la velocidad del proceso, la representación de las mismas muestra las zonas con mayores demandas energéticas lográndose establecer la dinámica del proceso. Como se presenta a continuación en la fig3.22.



Figura 3.22. Variación de la energía cinética mientras pasa la pieza

La distribución de la energía cinética a nivel de partículas se muestra en la Fig 3.23, mostrando los mayores valores en la zona de corte tanto para las partículas como para el implemento. Las tensiones de contacto entre la herramienta y las partículas se muestran en color rojo y verde, destacándose la fuerza que ejerce la cuchilla durante el contacto con las partículas de suelo, lo que evidencia



3.10 Simulación de la labranza

la

El arado de vertedera es considerad el método convencional para operaciones de primera labranza, como método alternativo se ha introducido el paraplogth que es un implento que posee la capacidad de no invertirel suelo por lo cual se considera dentro de la labranza conservacioista (Figure 3.24).



(b)

Figure 3.24 Paraplough (a), arado de vertedera (b).

(a)

Para realizar una comparación mediante la simulación de ambos procedimientos se realizó un modelo virtual donde para las condiones *medias* de suelo en los órganos se determinan las fuerzas de tiro así como el patrón de defragmentación (Figura 3.25).



Figure 3.26 Labranza con paratill (a), arado de vertedera (b).

Durante la simulación el patrón de deformación evaluado de forma cualitativa muestra por el arado de vertedera mostró que las partículas cambiaban su posición inicial siendo depositadas longitudinalmente al recorrido del implemento fuera de la superficie labrada caracterizada por una baja fragmentación del suelo. Por su parte el *paraplogth* mantiene las partículas en una posición cercana a la original sometiéndolas solamente a un movimiento vertical lo que al caer propicia una alta defragmentación (Figure 3.27).



Figure 3.27 Fuerza de tiro en la labranza.

El comportamiento de las fuerzas de tiro se muestra en la Figure 3.27, en el mismo se muestra una demanda de 0.13 N menor en el *paratill* lo que brinda criterios sobre la eficiencia energética del mismo. Estos resultados están en concordancia con los obtenidos por Shrestha *et al.* (2001). En un estudio encaminado a mejorar los parámetros del diseño del arado de vertedera. Los valores de fuerza obtenidos se corresponden con los determinados por Desbiolles *et al.* (1997), en un modelo para predecir las demanda de tracción en operaciones de labranza.

CONCLUSIONES

- El contenido de humedad y la densidad constituyen factores que modifican el comportamiento mecánico de suelo estudiado, el módulo de Young, la cohesión y la fricción aumentan su magnitud con el aumento de la densidad y disminuyen con el aumento de la humedad, obteniéndose una ecuación empírica para cada una de ellas.
- En el estudio estático del implemento del paratill se obtuvo que cuenta con la resistencia adecuada, mostrando un elevado coeficiente de seguridad.
- Se logra modelar el sistema implemento-suelo empleando el método de los elementos discretos para un modelo simplificado con partículas esféricas y combinadas
- 4. Mediante la simulación del movimiento del paratill a través del bloque de suelo se exponen los patrones de movimiento y deformación de las partículas de suelo así como los principales esfuerzos a que está sometida la herramienta de labranza.

RECOMENDACIONES

Emplear diferentes modelos de aperos para simular operaciones de labranza, subsolado y otras que comúnmente se aplican durante la preparación y el manejo del suelo.

Extender el modelo a otros tipos de suelos que posibilite la predicción de las fuerzas así como el comportamiento del suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBAS, E.-Z.; P. C. JOHN y W. A. DAVID: "Three-dimensional finite elements for the analysis of soil contamination using a multiple-porosity approach", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 30 (7): 577-597, 2006. ISSN:1096-9853.
- ABO-ELNOR, M.; R. HAMILTON y J. T. BOYLE: "Simulation of soil-blade interaction for sandy soil using advanced 3D finite element analysis", *Soil and Tillage Research*, vol. 75 (1): 61-73, 2004. ISSN:0167-1987.
- ALUKO, O. B. y H. W. CHANDLER: "A Fracture Strength Parameter for Brittle Agricultural Soils", *Biosystems Engineering*, vol. 93 (2): 245-252, 2006. ISSN:1537-5110.
- ASAF, Z.; D. RUBINSTEIN y I. SHMULEVICH: "Determination of discrete element model parameters required for soil tillage", *Soil and Tillage Research*, vol. 92 (1-2): 227-242, 2007. ISSN:0167-1987.
- AYERS, P. D.: "Utilizing the torsional shear test to determine soil strength-properties relationships", *Soil and Tillage Research*, vol. 10 (4): 373-380, 1987. ISSN:0167-1987.
- BARBER, R. G.; M. ORELLANA; F. NAVARRO; O. DIAZ y M. A. SORUCO: "Effects of conservation and conventional tillage systems after land clearing on soil properties and crop yield in Santa Cruz, Bolivia", *Soil and Tillage Research*, vol. 38 (1-2): 133-152, 1996. ISSN:0167-1987.
- BIGHAM & BROTHERS CO: Bigham Brothers, Inc. Subsoilers: Shear Bolt Paratill [en línea] Abril 2007. Disponible en: <u>http://www.bighambrothers.com/ptillshr.htm</u> [Consulta: 10/3/2008].
- CAI, Y.; L. ZHANG y J. QIAN: "Discrete Element Method Simulation and Experimental Verification on Roller Compaction of Fine Sand", *Tongji Daxue Xuebao/Journal of Tongji University*, vol. 45 (4): 527-532, 2017. ISSN:0253374X (ISSN).
- CARTER, M. R. y H. DANIEL: "Encyclopedia of Soils in the Environment", CONSERVATION TILLAGE, pp 306-311, Oxford: Elsevier, 2005.
- CHIVENGE, P. P.; H. K. MURWIRA; K. E. GILLER; P. MAPFUMO y J. SIX: "Long-term impact of reduced tillage and residue management on soil carbon stabilization: Implications for conservation agriculture on contrasting soils", *Soil and Tillage Research*, vol. 94 (2): 328-337, 2007. ISSN:0167-1987.
- COETZEE, C. J.: "Review: Calibration of the discrete element method", *Powder Technology*, vol. 310 104-142, 2017. ISSN:00325910 (ISSN).
- COETZEE, C. J. y D. N. J. ELS: "Calibration of discrete element parameters and the modelling of silo discharge and bucket filling", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 65 (2): 198-212, 2009. ISSN:0168-1699.
- COULOMB, C. A.: "Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelues problemes de statique relatifs a l'architecture", *Mem. Acad. Roy. des Sciences, Paris, 3, p.38*, vol. 1776.
- DAVOUDI, S.; R. ALIMARDANI; A. KEYHANI y R. ATARNEJAD: "A Two Dimensional Finite Element Analysis of a Plane Tillage Tool in Soil Using a Non-linear Elasto-Plastic Model", *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, vol. 3 (3): 498-505, 2008.

- DESBIOLLES J.M.A.; GODWIN R.J.; KILGOUR J.; B. B. S. J. y 295-309.: "An approach for prediction of draft required by primary tillage implements operating in field conditions.", *Agric. Eng*, vol. 66 1997.
- GABIRI, G.; B. DIEKKRÜGER; C. LEEMHUIS; S. BURGHOF; K. NÄSCHEN; I. ASIIMWE y Y. BAMUTAZE: "Determining hydrological regimes in an agriculturally used tropical inland valley wetland in Central Uganda using soil moisture, groundwater, and digital elevation data", *Hydrological Processes*, vol. 32 (3): 349-362, 2018. ISSN:08856087 (ISSN).
- GEBREGZIABHER, S.; A. M. MOUAZEN; H. VAN BRUSSEL; H. RAMON; F. MERESA; H. VERPLANCKE, et al.J. DE BAERDEMAEKER: "Design of the Ethiopian ard plough using structural analysis validated with finite element analysis", *Biosystems Engineering*, vol. 97 (1): 27-39, 2007. ISSN:1537-5110.
- GRIM, R. E.: "THE HISTORY OF THE DEVELOPMENT OF CLAY MINERALOGY", *Clays* and *Clay Minerals*, vol. 36 (2): 97-101, 1988. ISSN:0009-8604.
- HANG, C.; Y. HUANG y R. ZHU: "Analysis of the movement behaviour of soil between subsoilers based on the discrete element method", *Journal of Terramechanics*, vol. 74 35-43, 2017. ISSN:00224898 (ISSN).
- HERRERA, M.; C. IGLESIAS; O. GONZALEZ; E. LÓPEZ y A. L. SÁNCHEZ: "Propiedades mecánicas de un Rhodic Ferralsol requeridas para la simulación de la interacción suelo implemento de labranza mediante el Método de Elementos Finitos: Parte I", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 17 (3): 31-37, 2008.
- HETTARATCHI, D. R. P. y A. R. REECE: "Simetrical three-dimensional soil failure.", Journal of Terramechanics, vol. 4 (3): 45-67, 1967.
- HUANG, W.; D. SHENG; S. W. SLOAN y H. S. YU: "Finite element analysis of cone penetration in cohesionless soil", *Computers and Geotechnics*, vol. 31 (7): 517-528, 2004. ISSN:0266-352X.
- KARMAKAR, S. y R. L. KUSHWAHA: "Dynamic modeling of soil-tool interaction: An overview from a fluid flow perspective", *Journal of Terramechanics*, vol. 43 (4): 411-425, 2006. ISSN:0022-4898.
- LAMBE, T. W. y R. V. WHITMAN: *Soil Mechanics, Ed.* JOHN WILLEY & SONS, Massachusetts Institute of Technology, New Yorks, Isbn: 1969.
- LIAO, C.-L.; T.-P. CHANG; D.-H. YOUNG y C. S. CHANG: "Stress-strain relationship for granular materials based on the hypothesis of best fit", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 34 (31-32): 4087-4100, 1997. ISSN:0020-7683.
- MCKYES, E. y O. S. ALI: "The cutting of soil by narrow blades.", *Journal of Terramechanics*, vol. 14 (2): 43-58, 1977.
- MOOTAZ, A. E.; H. R. y J. T. BOYLE: "3D Dynamic analysis of soil-tool interaction using the finite element method", *Soil & Tillage Research*, vol. 40 51-62, 2003.
- MORRIS, N. L.; P. C. H. MILLER; J.H.ORSON y R. J. FROUD-WILLIAMS: "The adoption of non-inversion tillage systems in the United Kingdom and the agronomic impact on soil, crops and the environment--A review", *Soil and Tillage Research*, vol. 108 (1-2): 1-15, 2010. ISSN:0167-1987.
- MOUAZEN, A. M. y M. NEMENYI: A finite element model of soil loosening by a subsoiler with respect to soil conservation. Memorias de 9th Conference of the International-Soil-Conservation-Organisation, Aug 1996, pp. 549-556, Bonn, Germany. Catena Verlag, ISI:000077135800077, 1996.
- MOUAZEN, A. M. y M. NEMÉNYI: "Finite element analysis of subsoiler cutting in nonhomogeneous sandy loam soil", *Soil and Tillage Research*, vol. 51 (1-2): 1-15, 1999. ISSN:0167-1987.

- OBERMAYR, M.; K. DRESSLER; C. VRETTOS y P. EBERHARD: "Prediction of draft forces in cohesionless soil with the Discrete Element Method", *Journal of Terramechanics*, vol. 48 (3): 47-58, 2011.
- OÑATE, E. y J. ROJEK: "Combination of discrete element and finite element methods for dynamic analysis of geomechanics problems", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, vol. 193 3087-3128, 2004.
- PAYNE, P. C. J.: "The relationship between the mechanical properties of soil and the performance of simple cultivation implements.", *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 4 (4): 312-325, 1956.
- PENG, C.; M. ZHOU y W. WU: Large deformation modeling of soil-machine interaction in clay. En: Dyskin, A.;Papamichos, E.;Papanastasiou, P.andPasternak, E. (eds.). Springer Verlag, pp. 249-257, 2017.
- PERDOK, U. D. y J. K. KOUWENHOVEN: "Soil-tool interactions and field performance of implements", *Soil and Tillage Research*, vol. 30 (2-4): 283-326, 1994. ISSN:0167-1987.
- PERON, H.; J. Y. DELENNE; L. LALOUI y M. S. EL YOUSSOUFI: "Discrete element modelling of drying shrinkage and cracking of soils", *Computers and Geotechnics*, vol. 36 (1-2): 61-69, 2009. ISSN:0266-352X.
- PERUMPRAL, J. V.; R. D. GRISSO y C. S. DESAI: "A soil-tool model based on limit equilibrium analysis", *Transactions of the ASABE*, vol. 26 (4): 991-996, 1983.
- S. H. LIU, D. A. S.: "Simulating the collapse of unsaturated soil by DEM", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 26 (6): 633-646, 2002. ISSN:1096-9853.
- SAHU, R. K. y H. RAHEMAN: "An approach for draft prediction of combination tillage implements in sandy clay loam soil", *Soil and Tillage Research*, vol. 90 (1-2): 145-155, 2006. ISSN:0167-1987.
- SHEN, J. y R. L. KUSHWAHA (eds.) 1998. Soil-Machine interactions: A finite element perspective., New York: Marcel Dekker, Inc.
- SHMULEVICH, I.; Z. ASAF y D. RUBINSTEIN: "Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method", *Soil and Tillage Research*, vol. 97 (1): 37-50, 2007. ISSN:0167-1987.
- SHMULEVICH.; Z. ASAF y D. RUBINSTEIN: Interaction between Soil and a Wide Cutting Blade Using the Discrete Element Method, 46pp., Faculty of Civil and Environmental Engineering, Agricultural Engineering Department, Technion - Israel Institute of Technology, Haifa 32000, Israel, 2006.
- SHRESTHA, D. S.; G. SINGH y G. GEBRESENBET: "PM--Power and Machinery: Optimizing Design Parameters of a Mouldboard Plough", *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 78 (4): 377-389, 2001. ISSN:0021-8634.
- SUN, J.; Y. WANG; Y. MA; J. TONG y Z. ZHANG: "DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth >40 cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics", *Advances in Engineering Software*, vol. 119 30-37, 2018. ISSN:09659978 (ISSN).
- SWICK, W. C. y J. V. PERUMPRAL: "A model for predicting soil-tool interaction", *Journal of Terramechanics*, vol. 25 (1): 43-56, 1988. ISSN:0022-4898.
- TADESSE, D.: Evaluating DEM with FEM perspectives of load soil-interaction, 231pp., Philosophical Doctor, Wageningen University, 2004.
- THALLAK, G.; S. SITHARAM; V. DINESH y N. SHIMIZU: "Micromechanical modelling of monotonic drained and undrained shear behaviour of granular media using threedimensional DEM", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 26 (12): 1167-1189, 2002. ISSN:1096-9853.

- TIJSKENS, E.; H. RAMON y J. D. BAERDEMAEKER: "Discrete element modelling for process simulation in agriculture", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 266 493-514, 2003.
- UCGUL, M.; C. SAUNDERS y J. M. FIELKE: Particle and geometry scaling of the hysteretic spring/linear cohesion contact model for discrete element modelling of soiltool simulation. Memorias de, 2017, pp. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2017.
- VANNIER, E.; O. TACONET; R. DUSSÉAUX y F. DARBOUX: "A study of clod evolution in simulated rain on the basis of digital elevation models", *Catena*, vol. 160 212-221, 2018. ISSN:03418162 (ISSN).
- YIN, S.; Z. ZHU; L. WANG; B. LIU; Y. XIE; G. WANG y Y. LI: "Regional soil erosion assessment based on a sample survey and geostatistics", *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 22 (3): 1695-1712, 2018. ISSN:10275606 (ISSN).
- ZHENG, K.; J. HE; H. LI; H. ZHAO; H. HU y W. LIU: "Design and Experiment of Combined Tillage Implement of Reverse-rotary and Subsoiling", *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, vol. 48 (8): 61-71, 2017. ISSN:10001298 (ISSN).