

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE SUBSOLADO PROFUNDO PARA LA EMPRESA PALMAS OLEAGINOSAS BUCARELIA S.A.

---

**RICARDO ALFONSO JAIMES ROLÓN**

*Profesor Escuela de Ingeniería Mecánica  
Universidad Industrial de Santander*

**ADOLFO LEÓN ARENAS LANDINEZ**

*Profesor Escuela de Ingeniería Mecánica  
Universidad Industrial de Santander*

**JAIME ENRIQUE ZÁRATE COLMENARES**

*Ingeniero Mecánico  
Universidad Industrial de Santander*

**CIRO ALFONSO VILLAMIZAR RIVERA**

*Ingeniero Mecánico  
Universidad Industrial de Santander*

*decfmec1@uis.edu.co*

## RESUMEN

*Este trabajo de grado consiste en el diseño y construcción de un equipo de subsolado profundo para contrarrestar los problemas de compactación del suelo, presentados en las plantaciones de Palma Africana de la empresa Palmas Oleaginosas Bucarelia S.A. Fundamentados en normas internacionales y con el estudio de las propiedades mecánicas y agrológicas de los suelos de la plantación; se formuló matemáticamente el diseño de la Herramienta. El modelamiento matemático utilizó programas basados en elementos finitos como: Solid Edge V-11 Academic Copy, Dynamic Designer Motion y COSMOS DesignSTAR 3.0. La construcción se validó en el seguimiento de los modelos y bajo procedimientos de fabricación y maquinado. Las pruebas del implemento están fundamentadas en normas técnicas, y procedimientos establecidos por la ASAE. Este trabajo busca ser el inicio de las actividades del grupo de desarrollo de Sistemas Mecánicos, de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.*

**PALABRAS CLAVE:** Subsolador, Subsolado, Suelo, Compactación, Labranza Profunda, Palma Africana.

## ABSTRACT

*This Project consists of the design and construction of an equipment of sub soiling deep to resist the problems of compactation of the soil, which appear in the plantations of African Palm-tree of the Company "Palmas Oleaginosas Bucarelia S.A." Based on international norms and with the study of the mechanical and others properties of grounds of the plantation; the design of the Tool was mathematically formulated. This mathematic model used programs based on finite elements like: Solid Edge V-11 Academic Copy, Dynamic Designer Motion and COSMOS DesignSTAR 3.0. The construction was validated in the pursuit of the models and under procedures of manufacture. The tests of the equipment are based on practical standards, and procedures established by the ASAE. This work looks for to be the beginning of the activities of the group of development of Mechanical Systems, of the school of Mechanical Engineering of the Industrial University of Santander*

**KEYWORDS:** Subsoiler, Sub soiling, Deep Tillage, Soil, Compactation, African Palm-tree.

## INTRODUCCIÓN

El cultivo de palma africana viene dando una alta prioridad a la investigación y la tecnología mediante programas de mejoramiento genético, sanidad, riego, productividad de los procesos, beneficios en la salud y nutrición humana y reducción del impacto ambiental.

Para su consolidación futura, esta cadena productiva requiere un mayor dinamismo en nuevas siembras y renovación de plantaciones; profundizar el proceso de generación y adopción de nuevas tecnologías y la modernización de las plantas extractoras.

En la parte de suelos se han llevado, gracias a convenios con otras entidades públicas, estudios de requerimientos edafológicos mínimos para el cultivo de palma africana, así como la valoración de los suelos colombianos para este cultivo. Con respecto a la degradación poco se ha estudiado sobre el tema, no hay criterios de comparación técnicos que permitan concluir cuando un suelo con cultivos de palma africana se encuentra degradado.

Empíricamente se sabe que la compactación del suelo es un problema de degradación influyente en los resultados de producción de un cultivo, generado por el uso irracional de maquinaria agrícola.

El presente trabajo pretende solucionar o al menos minimizar este problema, buscando además que los palmeros utilicen criterios técnicos e ingenieriles para la utilización o no del subsolador, eliminando la cultura de realizar subsolado por costumbre.

## ESTADO ACTUAL DEL ARTE

En los últimos años CENIPALMA, ha venido estudiando las variables más incidentes en el proceso de siembra, cosecha y beneficio de palma de aceite. Con respecto al suelo ha determinado que la compactación producida, ya sea por el tránsito de maquinaria agrícola como por el de semovientes utilizados en las labores propias del cultivo, influye directamente en el desarrollo vegetativo de la planta y por lo tanto en la producción total de la plantación.

En la actualidad el manejo del subsolado en las diferentes plantaciones se realiza sin ningún criterio técnico, no existe un patrón de comparación que mida el estado de degradación del suelo, ni existe valoración posterior al trabajo que pueda indicar si el suelo mejoró sus propiedades físicas. En el cultivo de Palma Africana solo la costumbre

de realizarlo es la única variable tomada en cuenta, es por esto que muchos cultivadores han tenido experiencias desastrosas con el subsolado. Se pretende con este proyecto tener un criterio técnico en la valoración de la degradación del suelo específicamente a la compactación, que nos permita dar la respectiva solución.

## MARCO TEORICO

### *Propiedades Dinámicas del Suelo*

Las propiedades dinámicas más importantes del suelo dependen fundamentalmente de la cantidad de arcilla y contenido de humedad, entre las principales tenemos: cohesión, adhesión, ángulo interfase suelo/suelo y ángulo interfase suelo/herramienta.

### *Teoría de Coulomb Aplicada a Parámetros Suelo/Suelo*

La resistencia a la falla de un suelo depende del esfuerzo de corte máximo que este puede resistir, por lo tanto, es función de la magnitud de la deformación y del esfuerzo normal sobre la superficie.

Al graficar los valores del esfuerzo máximo de corte con los valores respectivos de esfuerzo normal se obtiene una relación que teóricamente es lineal. La ecuación de esta línea lleva el nombre de Coulomb, quien originalmente la desarrolló e indicó que la resistencia máxima al cizallar depende de los componentes de adhesión y cohesión del suelo.

$$\tau_{\max} = c + \sigma * \tan \Phi \quad (1)$$

En donde:

$\tau_{\max}$  = Máximo esfuerzo de corte

$c$  = Cohesión del suelo

$\sigma$  = Esfuerzo normal a la superficie de falla

$\Phi$  = Ángulo de fricción interna suelo/suelo

En estudios posteriores, Micklethwaite (1944) expresó la ecuación de Coulomb en términos de fuerza al multiplicar la ecuación (1) por el área superficial:

$$\tau * A = A * (c + \sigma \tan \Phi) \quad (2)$$

$$H_{\max} = c * A + Q * \tan \Phi$$

En donde:

$H_{\max}$  = Fuerza de corte máxima

$A$  = Área de la superficie de falla

$Q$  = Carga normal en la superficie

Se puede concluir que, para un suelo con cierto valor de cohesión y fricción, la fuerza máxima de corte para ocasionar la falla en el suelo depende además de la superficie de contacto (A) para el componente de cohesión y de la carga normal (Q) para el componente de fricción.

### Teoría de Coulomb Aplicada a los Parámetros Suelo / Herramienta

Utilizando la teoría de Coulomb, con aplicación directa a la herramienta, el esfuerzo de deslizamiento suelo/herramienta esta dado por:

$$\tau = Ca + \sigma * \tan \delta \quad (3)$$

### Caracterización de Suelos

La física de suelos estudia los estados y movimientos de la materia, así como los flujos y transformaciones de la energía en el suelo. El conocimiento de las propiedades físicas permite conocer mejor la importancia y efectos de las actividades agrícolas fundamentales, tales como la mecanización de las tierras, el drenaje, el riego, la conservación de los suelos y el agua, el manejo de los cultivos y de los residuos de cosecha. Algunas características de los suelos son mencionadas a continuación:

**Horizonte (Perfil del suelo).** Esta propiedad se refiere a estado de capas que forman el suelo (ver Figura 1).

**Resistencia del suelo a la penetración.** La resistencia de un suelo a la deformación por compresión o deformación por cizalla, esta determinada por su resistencia mecánica. El suelo tiene estados físicos definidos, los cuales son :

- Sólido o cementado
- Estado friable
- Sólido elástico
- Líquido viscoso

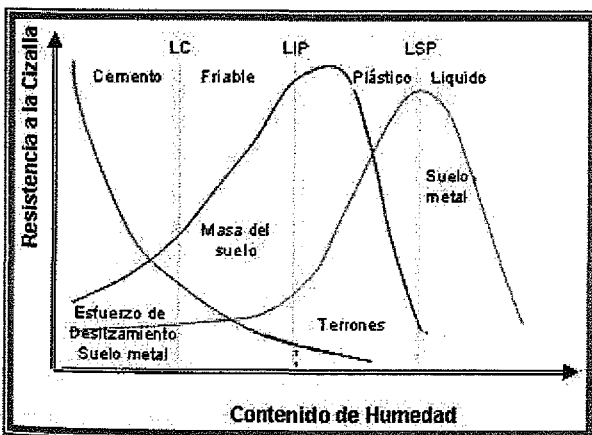


Figura 1. Estados característicos de un suelo.

**Textura.** Se refiere específicamente a las proporciones relativas de las partículas o fracciones de arena, limo y arcilla en la tierra fina del suelo.

**Humedad (w).** La humedad es el contenido relativo de agua en el suelo. Para el presente trabajo se siguió el procedimiento establecido para este tipo de pruebas por el Laboratorio de Suelos de la Escuela de Ingeniería Civil.

**Densidad.** Es la resultante de la relación masa a volumen.

- Densidad Aparente. Su determinación es conocer la masa del suelo seco y el volumen total del suelo.
- Densidad Real. En la densidad real, el volumen cuantificado es el correspondiente a las partículas del suelo, omitiendo el volumen ocupado por los poros.

**Infiltración.** Determina el tiempo que el agua debe permanecer sobre la superficie del suelo para permitir un humedecimiento adecuado hasta la profundidad deseada (Ver Figura 2).

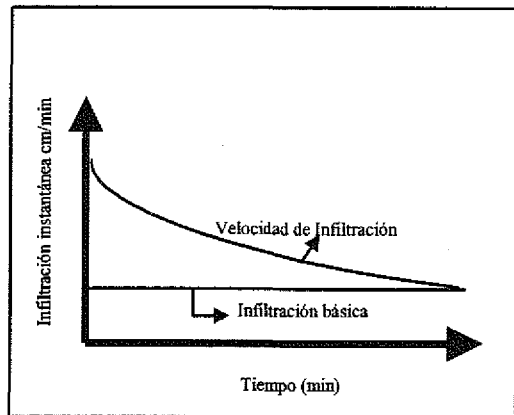


Figura 2. Relación de la Infiltración instantánea con el tiempo y con la infiltración básica.

### Influencia de la Mecánica de Suelos en la Herramienta de Labranza

La situación ideal de la labranza se alcanzará cuando se puedan seleccionar suelos que cumplan el requisito de tener un alto límite inferior de plasticidad LIP y Bajo Índice de Plasticidad. Las operaciones de labranza se deben llevar a cabo en condiciones de humedad óptimas (normalmente entre LC y LIP). Estos valores fueron identificados y cuantificados en las pruebas de humedad y Límites de Atterberg.

## METODOLOGIA

### Identificación Variables de Diseño y de Comparación.

A partir de la caracterización de los suelos y para un correcto diseño de la herramienta, se determinó la influencia de las siguientes variables:

#### Variables de diseño.

- Resistencia del suelo a la penetración (Psi).
- Densidad Real y Densidad Aparente ( $\text{g/cm}^3$ ).
- Humedad del suelo (%).
- Textura (%).
- Infiltración ( $\text{cm/min}$ )
- Perfil del suelo (Horizonte).
- Velocidad de Operación ( $\text{Km/h}$ ).
- Relación de velocidad del tractor.
- Potencia en la barra de tiro (Hp).

#### Variables de comparación.

- Infiltración.
- Densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ ).
- Área de suelo trabajada e incrementada por la herramienta ( $\text{cm}^2$ ).
- Resistencia a la penetración (Psi).

### Cuantificación de las Variables de Diseño y Comparación

Las variables de diseño identificadas en el numeral anterior deben ser cuantificadas en la plantación utilizando los implementos agrícolas de subsolación actuales, mediante pruebas de campo regidas bajo la normatividad internacional emitida por American Society of Agricultural Engineers ASAE STANDAR.

Adicionalmente se contó con la asesoría de personas con experiencia en medición de variables del suelo y de maquinaria agrícola adscritos al Instituto Nacional de Suelos Corpoica- Tibaitata, expertos en el manejo y recuperación de suelos degradados generados por los semovientes. De igual forma se contó con el apoyo de instructores del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA e investigadores del Instituto Colombiano Agropecuario ICA y CORPOICA Regional Santander. Por parte de la Fundación Centro de Mecanización Agrícola de Bucaramanga prestó asesoría y equipos para el desarrollo de este proyecto.

En la **Tabla 1** se presenta el resumen de las variables cuantificadas y su valor.

Tabla 1. Resumen de variables cuantificadas

VARIABLE	UNIDAD	VALOR					
Fuerza de corte generada por la herramienta	N	73575					
Velocidad de operación	$\text{Km/h}$	3.2					
Relación de velocidad del tractor	-	Tercera con bajo					
Potencia en la barra de tiro	Hp	88					
Potencia a la salida del motor	Hp						
Resistencia del suelo a la penetración	Psi	Lote 10-79		Lote 10-97			
		Prof (cm)	Valor	Prof (cm)	Valor		
		0-5	170	0-5	170		
		5-10	160	5-10	160		
		10-20	150	10-20	150		
>20	140	>20	140				
Densidad real	$\text{g/cm}^3$	Lote 10-79		Lote 10-97			
		2.0775		2.345			
Densidad aparente	$\text{g/cm}^3$	Lote 10-79		Lote 10-97			
		1.375		1.515			
Textura	%	Lote 10-79			Lote 10-97		
		Limo	Arcilla	Areña	Limo	Arcilla	Areña
		41.87	40.16	17.47	24.48	22.39	51.19
Humedad del suelo	%	Lote 10-79			Lote 10-97		
		9.59			10.995		
Profundidad de trabajo	cm	0-60					
Ancho de trabajo	cm	100					
Área de suelo trabajado	$\text{cm}^2$	> 1192					
Área de suelo incrementado	$\text{cm}^2$	< 492					

### Modelamiento Matemático

Los modelos utilizados para el cálculo de la fuerza de corte utilizados en este proyecto de grado fueron:

- \* Modelamiento matemático basado en la Ecuación Fundamental para el Movimiento de Tierra (Universal Equation Earth Moving (FEE)). Desarrollado por Reece y Equipo de Investigadores 1964. Adaptada por la Sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas ASAE 1969.
- \* Fórmula recomendada por Norma ASAE D497.4 Mar 1999 Numeral 4.1.1

Los modelos anteriores se derivan de las ecuaciones utilizadas por Coulomb para el cálculo de la fuerza de corte, sin embargo los modelos de Reece y ASAE son más cercanos a la realidad ya que involucra parámetros como textura, patinamiento, profundidad de trabajo, velocidad de trabajo, etc.

*Análisis estático de las fuerzas resistivas en una cuña de falla de suelo.* Modelamiento matemático basado en la Ecuación Fundamental para el Movimiento de Tierra (FEE), desarrollado por Reece y Equipo de Investigadores 1964. Adaptada por la Sociedad Americana de Ingenieros

Agrícolas ASAE 1969. Este modelo analiza la mecánica de las herramientas del cultivo considerando factores como cohesión, adhesión, ángulo de fricción suelo/suelo y suelo/herramienta, y densidad. Las fuerzas de corte pueden variar significativamente dependiendo también de la geometría de la herramienta, la compactación del suelo y el tipo de clima presente.

- La Ecuación FEE no toma en cuenta las cargas dinámicas requeridas para acelerar una masa específica de suelo.
- Esta ecuación aproxima a una superficie plana, la superficie de falla no uniforme de la cuña de suelo (Ver Figura 3).
- Esta ecuación asume que la fuerza de sobrecarga ocasionada por el suelo desplazado hacia arriba por la herramienta, es uniforme, se concentra y actúa sobre el perfil de la herramienta.
- Se asume que el suelo disturbado se aloja en su totalidad sobre la cuña de falla, es decir no hay desplazamiento lateral de suelo.
- En estos modelos la fuerza actuante se considera inminente para inducir la falla en el suelo; es decir asemeja un modelos casi estático.
- El corte de la herramienta es la Fuerza total paralela a la dirección de desplazamiento del elemento motriz. (ver ASAE EP496.2 DEC99 clause 4.1.1; ASAE D497.2 MAR99 clause 4.1).
- Todos los análisis se hacen por unidad de espesor de la herramienta (w).

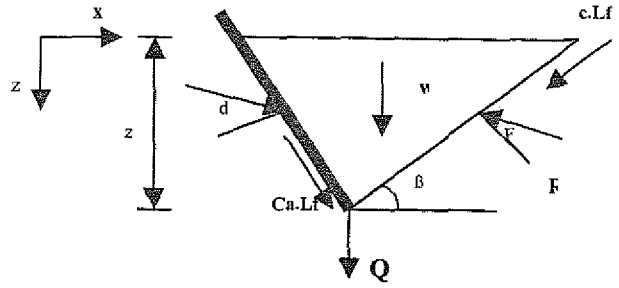


Figura 3. Diagrama de Cuerpo Libre de una Cuña de Falla de Suelo.

Modelo matemático basado en la Norma ASAE D497.4 Mar 1999 Numeral 4.1.1. Esta ecuación es utilizada por la Sociedad Americana de Ingenieros Agrónomos. La fuerza de corte requerida para tirar implementos de siembra y herramientas de labranza mínima, operadas como canilla de profundidad, es función del ancho del implemento y la velocidad con la cual es tirada. Para herramientas de labranza operadas a profundidades mayores el corte, además depende de la textura del suelo, profundidad y geometría de la herramienta. Esta ecuación nos va a permitir comprobar los valores obtenidos a partir de la Ecuación de Reece para el Movimiento de suelo.

$$D = F_i * (A + B + C(S)^2) * W * T$$

$$P(x) = \left( \frac{D(x) * S}{M} \right) \quad (5)$$

Donde:

**D:** Corte del Implemento en [N] o [lbf]

**F:** Parámetro de ajuste de textura del suelo. i: 1 para textura fina; 2 para textura media y 3 para textura de grano gruesa.

**A, B y C:** Son los parámetros específicos para cada máquina.

**S:** Velocidad de Campo [Km/h] o [Mill/h]

**W:** Es la anchura de la máquina o número de dientes o de herramientas.

**T:** Profundidad de labranza [cm] o [pulg]

Los factores anteriores se obtienen de la Tabla 1 de la Norma ASAE D497.1 o de variables cuantificadas en los suelos de la plantación de Palmas Bucarelia. Las variables textura, velocidad de campo y profundidad de labranza fueron cuantificados directamente en plantación. Los resultados obtenidos para la fuerza de corte y el consumo de potencia están resumidos en la **Tabla 16**, los cálculos y graficas esta ecuación pueden ser vistos desde el anexo H.37 y H.41. de Corte de la Herramienta sobre el suelo.

La Ecuación Fundamental para el Movimiento de Tierra se expresa como:

$$P = \gamma z^2 * N_\gamma + czN_c + QzNO + Ca * zN_{Ca} \quad (4)$$

Donde:

**P:** Reacción Total del Suelo [N/m]

**γ:** Densidad del Suelo [Kg/m<sup>3</sup>]

**z:** Profundidad [m]

**c:** Cohesión (kPa)

**Ca:** Adhesión (kPa)

**Q:** Carga de Sobrepresión (Peso del área de suelo incrementado) (kPa)

**ρ =** Angulo de Ruptura de Cuña de Suelo.

Para el desarrollo de la Ecuación Fundamental para el Movimiento de Tierra, se utilizaron variables cuantificadas en plantación tales como la densidad, profundidad de trabajo y la carga de sobrepresión. Para las variables cohesión, Adhesión son seleccionadas dependiendo de la textura del suelo.

### Modelamiento CAD de Elementos del Subsolador

Para la etapa del modelamiento CAD de las piezas del sistema se utilizó el programa Solid Edge pieza versión 11, luego se armaron los diferentes subconjuntos permitiendo al final la elaboración del sistema completo (ver Figura 4). Se utilizó el componente Solid Edge plano para la elaboración de cada uno de los planos los cuales pueden ser vistos en los anexos del proyecto de acuerdo al código asignado para cada pieza o subconjunto ubicado en la primera columna de la Tabla 17. En esta tabla se presenta las especificaciones técnicas de cada una de las piezas del sistema, así como la cantidad y el material para su construcción. Con respecto a los proveedores la gran mayoría de los elementos pueden ser adquiridos en Bucaramanga excepto el resorte que tiene que ser traído de Bogotá.

### Modelamiento CAE de Elementos del Subsolador

La valoración de los elementos más importantes se dio utilizando el software COSMOS Design Star utilizando para esto los datos tomados de la Resistencia a la Penetración del suelo a diferentes profundidades en los lotes seleccionados, los cuales se ubicaban como cargas en las diferentes caras del elemento. Se ubicaron restricciones en puntos en los cuales se ubicarían los pernos de sujeción para valorar las fuerzas que iban a soportar estos elementos.

Los elementos valorados fueron:

- Los tipos de canillas
- El puntero
- La implementación del disco de corte
- Barra portaherramientas

### Diseño de Elementos del Prototipo

*Consideraciones generales.* Los elementos pertenecientes al sistema de subsolado pueden ser vistos en la figura 6. El diseño de los elementos subsolador esta basado en:

- Los resultados obtenidos en las pruebas de campo de los equipos de subsolado existentes en la región.
- La pruebas de campo de la canilla prototipo.
- De los resultados obtenidos en el análisis CAE, utilizando para ello el software COSMOS DesignSTAR 3.0.
- Las necesidades del cliente, facilidad de reemplazo y adquisición de piezas del subsolador.

Las necesidades de la empresa Palmas Oleaginosas Bucarelia S.A. se refieren específicamente a los siguientes parámetros:

- Utilizar el sistema de enganche de tres puntos, debido a que es el sistema más utilizado en los tractores de la plantación.
- Diseñar el subsolador de tal forma que el consumo de potencia no exceda los 100 Hp, debido a que los tractores utilizados en las plantaciones de palma en la región son de baja capacidad en potencia (Potencia < 100 Hp).
- El equipo diseñado debe tratar de eliminar la menor cantidad de raíz de palma en lotes de palma adulta.

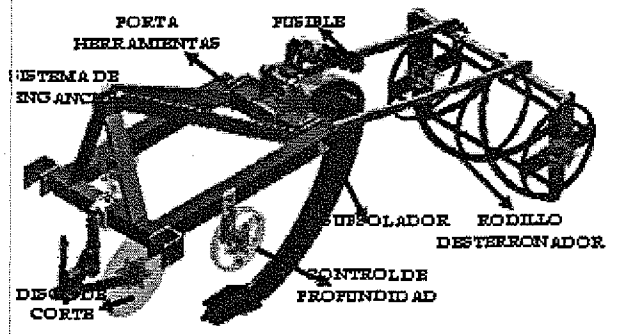


Figura 4. Elementos del sistema de subsolado.

### Construcción, Puesta en Funcionamiento y Pruebas Finales

Para la construcción del prototipo se utilizaron las instalaciones del taller de metalmecánica la Fundación Centro de Mecanización Agrícola de Bucaramanga C.M.A.B.\*.

Con los subconjuntos armados y ensamblados se procedió a realizar el montaje total del prototipo, para verificar el cumplimiento de los parámetros de diseño respecto su distribución, interferencias y ajustes, todo esto como proceso previo al montaje definitivo (ver Figura 5).

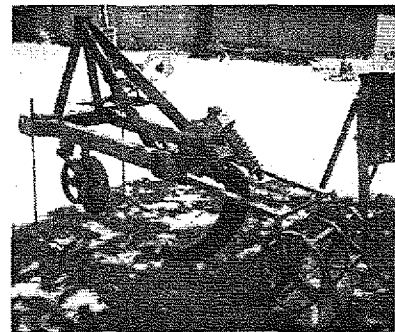


Figura 5. Montaje final prototipo.

\* Ubicado en el Km. 2 Vía Refugio, Guatiguará - Sede UIS, Piedecuesta, Colombia

*Prueba de la Canilla (montaje rígido).* Se obtuvieron datos de Velocidad de Operación en las dos marchas del tractor, profundidad de penetración y perfil de corte del puntero. Estos datos fueron valorados y procesados utilizando para ello el software Microsoft Excel. A partir de estos resultados se hallan variables derivadas tales como: área incrementada, área trabajada, área total, ancho de la herramienta y profundidad de trabajo.



Figura 6. Prueba inicial canilla con montaje rígido.

La evaluación de los resultados obtenidos y su comparación de los resultados de las pruebas iniciales con el subsolador recto permite deducir las siguientes conclusiones:

1. El perfil estructural de la Canilla Subsoladora le permitió profundizar hasta su máxima capacidad de trabajo, es decir 650 [mm], con un bajo consumo de potencia; soportando con suficiencia las cargas de flexión inducidas por la reacción del suelo al ser sometido a los esfuerzos de corte, generados por el implemento; y como factor representativo la ausencia de deformaciones en sus planos longitudinal y transversal.
2. El trabajo de subsolado lo realiza el *Puntero de Corte*, pues la geometría de la canilla permite que el estallamiento del suelo sea realizado de abajo hacia arriba, factor que lo diferencia del subsolado tradicional, realizado con subsolador recto donde el trabajo es realizado totalmente por la *canilla*, induciendo el fenómeno denominado volteo. Este comportamiento de la herramienta cumple uno de los requisitos de diseño planteado por parte del Equipo Agronómico de la Empresa al solicitar una herramienta que realice estallamiento del suelo, sin alterar su estructura.
3. Los perfiles de corte del puntero se encuentran dentro de los modelos establecidos para este tipo de herramientas, según el lineamiento seguido para el desarrollo del proyecto, además como factor representativo y que afianza la anterior deducción encontramos que el tipo de estallamiento permite aumentar el volumen del suelo, por ende disminuir los valores de Densidad Aparente, llevando esto al mejoramiento de los procesos de Infiltración de agua y aireación del suelo.

4. Realizadas las pruebas técnicas al equipo y las respectivas comparaciones con algunas de las efectuadas al subsolador recto podemos concluir que el diseño tanto del Puntero de Corte como del perfil de la Canilla Subsoladora mejoraron los procesos de subsolado.

### Pruebas

*Materiales y métodos.* Superado el proceso de construcción y pruebas parciales en el taller, se procedió a trasladar el prototipo a las plantaciones de la Empresa. Las pruebas finales se realizaron en los mismos lotes donde se llevaron a cabo las pruebas a los equipos subsoladores existentes, según lo planteado en los objetivos, para tener criterios de evaluación y comparación con el comportamiento del prototipo diseñado.

La evaluación del prototipo se basó en procedimientos similares a los utilizados en las pruebas iniciales a excepción del consumo de potencia, pues no se contó con el un Dinamómetro, equipo adecuado para medir la fuerza de corte de la herramienta sobre el suelo. El único ente que posee dichos Dinamómetros es el Instituto Nacional de Suelos CORPOICA Tibaitata Cundinamarca, quienes fueron los que permitieron, en las pruebas iniciales de subsoladores existentes en la región, su traslado, pero al cambiar en el último año las condiciones de préstamo y traslado de equipos, fue imposible realizar el préstamo. Por consiguiente se hizo énfasis en el cálculo de las demás variables, con el objeto de utilizar relaciones matemáticas para el cálculo indirecto de la potencia, para de esta forma entrar a comparar la herramienta diseñada con las existentes.

La Empresa Palmas Oleaginosas Bucarelia S.A. designó un comité para realizar la auditoria y supervisión de las pruebas; dicho comité estuvo conformado por las siguientes personas:

- Dr. Fernando Bernal Niño. Asesor Externo de P.O.B.
- Ing. Blanca Stella Gualdrón Rueda. Directora División Agronómico II.
- Ing. Guillermo Estrada. Director División Agronómico III.
- Ing. Edgar Ignacio Barrera. Jefe de Sanidad Vegetal y Desarrollo Agrícola.

El lote donde se realizaron la mayoría de pruebas fue el 10-79 pues posee los mayores problemas de compactación y además fue el lote donde se tomaron las pruebas iniciales de subsolado y propiedades físicas de suelo. Adicionalmente se tomó el lote 14-79 para realizar pruebas, debido a que en este se realizará próximamente renovación de cultivos.

Luego de terminar la etapa constructiva el equipo investigador decidió la valoración de las pruebas pero esta vez utilizando el prototipo diseñado. Con respecto a las pruebas de tipo agrológico algunas de ellas no pudieron ser cuantificadas debido las condiciones climáticas en que se encontraba la región en el momento de realizar la prueba del prototipo. Fue así como las pruebas de resistencia a la penetración y de Infiltración no fueron valoradas en la plantación porque aplicaban en el momento de la prueba.

Para poder cuantificar esta variable se ha dejado como recomendación de este proyecto la valoración directa de estas variables en el mes de enero del año 2005 y su correspondiente comparación con los datos tomados en las primeras pruebas y las realizadas en Julio del 2004.

Las pruebas realizadas en las plantaciones de palma así como los equipos utilizados pueden ser vistas en la **Tabla 2**. En la **Figura 7** se observa el sistema trabajando en plantación Bucarelia S.A.

*Tabla 2. Resumen de pruebas y equipos utilizados en plantación Bucarelia.*

<b>DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN EQUIPO DE SUBSOLADO PROFUNDO PARA LA EMPRESA PALMAS OLEAGINOSAS BUCARELIA S. A. PRUEBAS FINALES PROTOTIPO</b>	
<b>Fecha de prueba:</b>	<b>Lugar de la Prueba:</b>
1 de Julio 2004	Lotes 10-79 y 14-79, plantación Palmas Oleaginosas Bucarelia. Puerto Wilches.
<b>PRUEBAS BASICAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análisis de volteo</li> <li>• Densidad Aparente</li> <li>• Densidad Real</li> <li>• Infiltración</li> <li>• Patinamiento</li> <li>• Perfilometría</li> <li>• Resistencia a la penetración</li> <li>• Velocidad de operación</li> <li>• Ancho de corte</li> <li>• Area Incrementada</li> </ul>
<b>PRUEBAS DERIVADAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Area Trabajada</li> <li>• Fuerza de corte</li> <li>• Perdida de suelo</li> <li>• Porosidad</li> <li>• Potencia en la barra de tiro</li> <li>• Profundidad Real de penetración</li> </ul>
<b>EQUIPOS UTILIZADOS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tractor John Deere 5705, 85 HP</li> <li>• Sistema Prototipo Subsolador Curvo</li> <li>• Perfilómetro</li> <li>• Decametro</li> <li>• Cronómetro</li> <li>• Metro</li> <li>• Lotes de pruebas</li> </ul>



*Figura 7. Conjunto prototipo realizando pruebas de campo.*

## RESULTADOS

Los resultados de las pruebas finales del equipo de subsolado realizadas, serán comparadas cualitativamente y cuantitativamente tendiendo como patrón de comparación las realizadas con el subsolador recto del Centro de Mecanización Agrícola en el lote 10-79 en el año 2003. El procedimiento para este análisis está basado en comparación directa de las respectivas variables.

### *Consideraciones Iniciales*

1. Se utilizó la misma metodología de evaluación de los implementos basada en el documento FAO "Principios y prácticas de prueba y evaluación de máquinas y equipos agrícolas", seguido por el Instituto Nacional de Suelos. División Maquinaria de Corpoica Tibaitatá.
2. Las pruebas fueron realizadas en el mismo lote 10-79.
3. Las pruebas de Infiltración y de Resistencia a la Penetración no fueron tomadas, debido a las altas precipitaciones, lo cual impidió su valoración, pues estas pruebas están estrechamente relacionadas con el nivel de humedad del suelo.
4. La prueba de Fuerza de corte y consumo de potencia fue realizada indirectamente con los valores obtenidos para otras pruebas.

### *Análisis de los Resultados*

- El conjunto tractor-subsolador trabajó en el rango de bajas velocidades recomendadas por la norma ASAE para equipos de subsolado profundo.
- Los altos valores obtenidos de patinamiento presentados en las pruebas, se debieron específicamente al alto contenido de humedad del suelo, por la temporada de lluvias, se recomienda para futuras pruebas realizar las pruebas en un tiempo seco.



- El área de suelo incrementado en el lote 10-79 presentó una disminución considerable al compararla con las pruebas iniciales, favoreciendo la estructura final del suelo luego de producirse el estallamiento.
- Se presentó un gran aumento en el valor del área trabajada, este fenómeno favorece ampliamente la infiltración del agua, manteniendo niveles aceptables de humedad en el suelo.
- Las pruebas iniciales realizadas en plantación con los subsoladores rectos arrojaron una gran tasa de pérdida de suelo, con valores por encima del 100% al mantener una relación cercana al 1:1, en la pruebas del subsolador curvo la relación fue 5:1. En la Figura 8 se presenta una gráfica comparativa del subsolador recto y el subsolador curvo respecto a las áreas de suelo trabajado e incrementado.

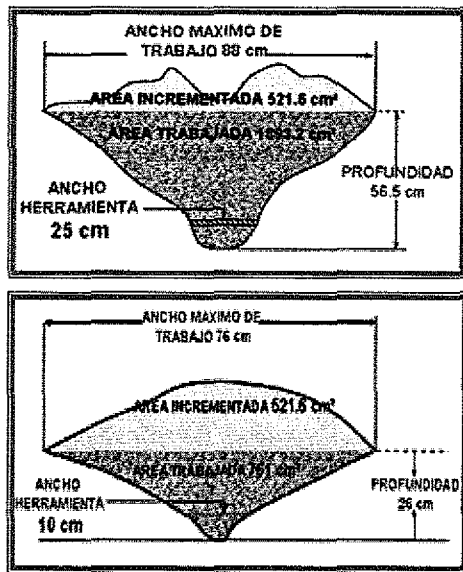


Figura 8. Relación tasa de pérdida del suelo.

- El análisis de la gráfica generada a partir de los datos de Perfilometría, permite hallar en la prueba final un gran aumento en la profundidad de trabajo, con valores que oscilan entre un 140 y un 180 % por encima respecto a las tomadas inicialmente con los subsoladores rectos. Cabe notar que esta profundidad fue alcanzada en un solo pase de tractor y sin ninguna labor previa de arado.
- La fuerza de corte generada por el implemento no se tomó directamente con la medición de un dinamómetro, para calcularla se utilizaron relaciones matemáticas que involucran variables ya cuantificadas como la velocidad de operación, el patinamiento y el tipo de suelo.
- El objetivo de que el sistema de subsolado profundo pudiera ser utilizado por un tractor de mediana

potencia fue cumplido a cabalidad; el sistema de subsolado profundo presentó un comportamiento de estallamiento y profundidad de trabajo excelente manteniendo bajos consumo de potencia.

- La Resistencia a la penetración no fue cuantificada, aunque se tenía como variable de comparación para demostrar la disminución en el grado de compactación del suelo del lote 10-79. Debido a las condiciones climáticas durante la prueba se determinó no realizarla, pues la alta humedad del suelo induce resultados erróneos.
- La Resistencia a la penetración como variable, permite reconocer fácilmente si el sistema de subsolado mejoró o no las condiciones del suelo (disminución de los valores de densidad aparente). Inherente al crecimiento del volumen del suelo tenemos aumento en el porcentaje de porosidad, el nivel de infiltración y el nivel de conservación de humedad del suelo. Es recomendable medir nuevamente esta variable dentro de 6, 12 y 18 meses después de realizado el subsolado.
- La disminución en los niveles de Densidad Aparente conlleva a un aumento en el número de poros en el volumen de suelo (porosidad); lo que permite incrementar el nivel de infiltración de agua y de aireación. Esta propiedad se tomó como un parámetro de comparación en la reducción de los niveles de compactación en suelos agrícolas.
- El análisis cualitativo del efecto del volteo se realizó directamente al efectuar la prueba de subsolado, donde el grupo de valoración observó que los niveles de estallamiento del suelo fueron excelentes, sin generar problemas serios de volteo del suelo.

## CONCLUSIONES

- Se creó y consolidó el Grupo de Desarrollo de Sistemas Mecánicos, para la investigación, diseño y construcción de maquinaria agrícola, diseñando y construyendo un perfil de subsolador que permitiera reducir la compactación y mejorara las propiedades físicas del suelo en las plantaciones de palma africana de aceite del Municipio de Puerto Wilches- Santander.
- Se integraron docentes y estudiantes de la Escuela de Ingeniería Mecánica en la conformación del Grupo de Desarrollo de Sistemas Mecánicos.
- Se fomentó el vínculo de la Escuela de Ingeniería Mecánica con la empresa Palmas Oleaginosas Bucarelia e instituciones oficiales tales como CORPOICA, Fundación Centro de Mecanización Agrícola de

Bucaramanga y el Servicio Nacional de Aprendizaje para generar soluciones de Maquinaria Agrícola que permitan aumentar la producción y el desarrollo del sector palmicultor en el departamento de Santander.

- Se disminuyó el nivel de compactación mejorando las propiedades físicas de los suelos, utilizando un equipo subsolador en el lote 10-79 de las plantaciones de palma de aceite de la empresa PALMAS OLEAGINOSAS BUCARELIA S.A. del municipio de Puerto Wilches-Santander.
- Se diseñó, construyó y se valoró técnicamente el funcionamiento un sistema de subsolado de fácil montaje, operación y mantenimiento, adaptándolo a un tractor de mediana potencia (85 Hp.), reemplazando el antiguo sistema de subsolado realizado por una Retroexcavadora de 150 Hp.
- Para toda labor de subsolado es fundamental realizar la caracterización de suelos, con el fin de identificar el estado actual de compactación para dar el tratamiento adecuado aplicando los conceptos de labranza reducida, optimizando con esto la labor del subsolador.
- Comparando los resultados de la prueba de Humedad con los de Límites de Atterberg se puede encontrar la temporada del año en el cual el suelo se encuentra en estado friable, para el cual el proceso de subsolado se realiza con menos consumo de potencia y mas alto nivel de estallamiento.
- Se evaluaron técnicamente antes y después del subsolado el comportamiento del sistema de potencia (tractor), el equipo de subsolado y el suelo de la región, utilizando las normas dadas por la Sociedad Americana de Ingenieros Agrónomos (ASAE).
- Se compararon los resultados experimentales de la fuerza de corte inducida por la herramienta al suelo, con los obtenidos analíticamente (Ecuación de Reece, Ecuación Numeral 4.11 Norma ASAE D497.4 Mar 99) y por elementos finitos (Dynamic Designer Motion y COSMOS DesignSTAR 3.0), obteniéndose valores muy similares.
- El perfil del diente del subsolador permitió reducir en un 30% el consumo de potencia del tractor. De igual forma la adaptación de alas al puntero permitió aumentar el área trabajada y disminuir el área incrementada en una relación 5:1 con respecto al subsolador recto que fue de 1:1.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] ALBAREDA HERRERA, José Manuel. Edafología. España. Talleres Gráficos Montilla. 1948.
- [2] ARCHIE, Stone. Maquinaria Agrícola. Editorial Continental. México. 1976. 693p.
- [3] ASHBURNER, Jhon. Elementos de diseño del tractor y herramientas de labranza. San José de Costa Rica. Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura. 1984. 473p.
- [4] COMPAÑÍA GENERAL DE ACEROS. Catalogo Aceros Antidesgaste XAR400 XAR500 y T1. Colombia. 2002.
- [5] DAVIES, Bryan. Manejo de suelo. Argentina. Editorial El Ateneo. 1987.
- [6] HUNT, Donnell. Maquinaria Agrícola, rendimiento económico, costos, operaciones, potencia y selección de equipos. 7 ed. México. Editorial Limusa. 1986. 451p.
- [7] MALAGON, C. D. Propiedades físicas de los suelos. Bogota. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 1978.
- [8] MARTINEZ S, Juvenal. Maquinaria Agrícola. UIS. FEDI. Colombia. 1987. 348p. 1963.
- [9] SKF. Catalogo General. Italia. Stamperia Artistica Nazionale. 1989.
- [10] STALLINGS, J. H, El Suelo, Su Uso Y Mejoramiento. Compañía Editorial Continental. México 1972.