

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

**DESARROLLO DE UN IMPLEMENTO
AGRÍCOLA PARA MEJORAR LA AIREACIÓN
Y LA HUMEDAD DEL SUELO**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

**DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA**



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

PRESENTA:

M. I. MIGUEL ANGEL PEÑA PERALTA

Septiembre de 2014
Chapingo, Estado de México, MÉXICO



**DESARROLLO DE UN IMPLEMENTO AGRÍCOLA PARA MEJORAR
LA AIREACIÓN Y LA HUMEDAD DEL SUELO**

Tesis realizada por el **M. I. Miguel Ángel Peña Peralta** bajo la dirección del comité asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR:



Dr. Eugenio Romantchik Kriuchkova

ASESOR:



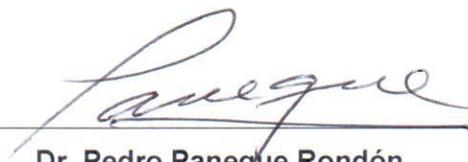
Dr. Luciano Pérez Sobrevilla

ASESOR:



Dr. Álvaro Morelos Moreno

LECTOR EXTERNO:



Dr. Pedro Paneque Rondón

DEDICATORIAS

A Sylvia

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

A la Universidad Autónoma Chapingo, al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de los Departamentos de Irrigación e Ingeniería Mecánica Agrícola, por las facilidades y el apoyo brindado para la realización de mis estudios de doctorado.

Al Dr. Eugenio Romanchik Kriuchkova por su paciencia y conocimiento, al Dr. Álvaro Morelos Moreno, al Dr. Luciano Pérez Sobrevilla y al Dr. Pedro Paneque Rondón. Un agradecimiento especial a la Dra. Rocío Cervantes Osornio, al Dr. José Antonio Yam Tzec y al Dr. Mauricio Carrillo García, por sus acertadas contribuciones.

Gracias al personal Administrativo del IAUA por la gestión en los tramites de titulación en especial a Rosa María y Mayra.

Agradezco a mi familia por su apoyo y comprensión, a mis hijos Gretchen y Hansel por darme fuerza y motivación. Al Sr. Andrés Peña Herrera por su gran apoyo en las pruebas de campo.

Un agradecimiento al Dr. José Reyes Sánchez, al Maestro Ramón Lobato silva, al Dr. Carlos Alberto Villaseñor Perea, y al Dr. Ramón Arteaga Ramírez, por su valioso apoyo al paso de los años en Chapingo.

Agradezco el apoyo del personal de la Subdirección de Servicios Asistenciales 2011 2014 de la Universidad Autónoma Chapingo, en especial a Tayde Espinosa Flores y al Ing. Martín Sosa Ramírez.

DATOS BIOGRÁFICOS

El autor de la presente tesis Miguel Ángel Peña Peralta, nació el 1 de octubre de 1976 en San Jerónimo Amanalco, Texcoco, Estado de México. En el año 2000 ingresó a la Universidad Autónoma Chapingo donde cursó la carrera de Ingeniero Mecánico Agrícola. En el año 2002 fue consejero universitario representando al Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola. En el año 2003 participó en el congreso Metánica en la Habana Cuba con el proyecto “Diseño de empaques para el transporte de piña.” En el año 2004 realizó una estancia en Berlín y Posdam Alemania para conocer el funcionamiento de la empresa ALBA Service Mit Sistem (empresa de reciclaje de basura) y ATB Instituto de Ingeniería Agrícola Bornim Posdam, con apoyo de la Universidad de Humboldt Berlín. En el año 2005 realizó su estancia preprofesional en el Tecnológico de Costa Rica sede San Carlos con el proyecto; diseño y construcción de una cosechadora de fríjol para la zona Huetar Norte, bajo el convenio México-Costa Rica para la producción de fríjol variedad Brunca.

Ha participado en los procesos de admisión de la Universidad Autónoma Chapingo como **aplicador** de 2003 a 2014.

En 2007 participó como coautor en el artículo científico: “Tomato yield and electrical conductivity on a tezontle fertigated greenhouse using a novel gravity injection system” en la revista, Canadian Biosystems Engineering, <http://www.bioeng.ca>. En 2008 colaboró como asesor de tesis de licenciatura titulada, “Daños mecánicos en cinco variedades de manzana”, además de formar parte del jurado examinador como vocal. En 2012 participo como jefe del Departamento de Internado, en 2013 fue jefe administrativo de la subdirección de servicios asistenciales y en 2015 jefe del comedor central, de la Universidad Autónoma Chapingo.

DESARROLLO DE UN IMPLEMENTO AGRÍCOLA PARA MEJORAR LA AIREACIÓN Y LA HUMEDAD DEL SUELO

Miguel Ángel Peña Peralta ¹
Eugenio Romantchik Kriuchkova ²

RESUMEN

La aireación y humedad del suelo son elementos esenciales para el crecimiento y desarrollo de las raíces de los cultivos, y su disponibilidad se reduce debido a la compactación del suelo, la cual es reflejada por el incremento en la densidad del suelo y la reducción de los espacios porosos. La labranza vertical es un tipo de labranza de conservación que mejora la aireación y la infiltración del agua de lluvia en el suelo sin voltear el prisma del suelo para no degradar su estructura, como sucede en la labranza convencional. En este trabajo se diseñó y construyó un rodillo aireador para mejorar la aireación del suelo e incrementar la infiltración del agua de lluvia en el suelo. Se desarrollaron las ecuaciones que describen 1) la cinemática de la rotación del rodillo aireador con el avance del tractor, 2) la relación esfuerzo-deformación y la deflexión de los elementos de corte, y 3) las propiedades físicas del suelo, tales como la humedad, densidad aparente, espacio poroso, compactación y difusión del oxígeno en el suelo. El rodillo aireador consistió de cuchillas metálicas de geometría triangular, montadas en discos porta-cuchillas en un eje sólido de acero, el cual fue fijado a un chasis acoplado al enganche de tres puntos de un tractor MF-592T. El implemento fue evaluado en diferentes condiciones de humedad del suelo, velocidad de trabajo, tipo de cuchillas y carga vertical adicional. El rodillo aireador incrementó la humedad, la porosidad total y la tasa de difusión del oxígeno. Las cuchillas de geometría asimétrica presentaron un mejor desempeño que las cuchillas simétricas, cuya mayor rigidez las hace más susceptibles a presentar fatigas y rupturas por las condiciones cíclicas de operación. La penetración apropiada de las cuchillas en el suelo se logró a una velocidad de 3 km h⁻¹ con una carga adicional de 200 kg.

Palabras clave: Aireación, humedad, compactación, rodillo aireador, cuchilla.

¹ Autor de la tesis.

² Director de la tesis.

DEVELOPMENT OF AN AGRICULTURAL IMPLEMENT TO IMPROVE THE AERATION AND HUMIDITY OF THE SOIL

Miguel Ángel Peña Peralta ¹
Eugenio Romantchik Kriuchkova ²

ABSTRACT

Soil aeration and soil humidity are essential elements for the growing and development of the crops root system, and their availability is reduced due to soil compaction, which is noted in the bulk density increment and the pore spacing reduction. Vertical tillage is a kind of conservation tillage that improves the soil aeration and rainwater infiltration into the soil without turning the soil prism for not degrading its structure, as it happens in the conventional one. In this research, an aeration roller, in order to improve the soil aeration and increase the rainwater infiltration into the soil was designed and built. Equations for describing 1) the kinematic of the aeration roller rotation respecting to the tractor travel speed, 2) the stress-strain relationship and the cutting tools deflection, and 3) the physical properties of the soil, such as moisture, bulk density, pore space, compaction and oxygen diffusion into the soil were developed. The aeration roller consisted of metallic knives of triangular geometry, mounted on hold-knives plates in a solid steel axle, which was fixed on a chassis engaged to the three hitch point linkage of a tractor MF-592T. The implement was evaluated in different conditions of soil moisture, travel speed, kind of knives and additional vertical load. The aeration roller increased the humidity, the total soil porosity and the oxygen diffusion rate. The knives having an asymmetrical geometry showed a better performance than the knives with a symmetrical one, whose greater stiffness makes them more susceptible to suffer fatigues and breakings due to the work cyclical conditions. The appropriate knives penetration into the soil was achieved in a travel speed of 3 km h⁻¹ with an additional vertical load of 200 kg.

Keywords: Aeration, humidity, compaction, aeration roller, knife.

¹ Thesis author.

² Thesis advisor.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Dedicatorias. -----	i
Agradecimientos. -----	ii
Datos Biográficos. -----	iii
Resumen / Abstract. -----	iv
Índice de Contenido. -----	v
Índice de Figuras. -----	viii
Índice de Tablas. -----	xi
Capítulo 1. Introducción General -----	1
1.1 Introducción. -----	1
1.2 Objetivos. -----	5
1.3 Hipótesis. -----	6
1.4 Literatura Citada. -----	7
Capítulo 2. Análisis Cinemático de las Herramientas de Corte de un Rodillo Aireador. -----	10
2.1 Resumen. -----	10
2.2 Introducción. -----	11

2.3	Materiales y Métodos. -----	13
2.4	Resultados y Discusiones. -----	19
2.5	Conclusiones. -----	27
2.6	Literatura Citada. -----	28

Capítulo 3. Análisis de Esfuerzos de las Herramientas de Corte de un

	Rodillo Aireador. -----	30
3.1	Resumen. -----	30
3.2	Introducción. -----	31
3.3	Materiales y Métodos. -----	32
3.4	Resultados y Discusiones. -----	35
3.5	Conclusiones. -----	40
3.6	Literatura Citada. -----	40

Capítulo 4. Efecto del Rodillo Aireador en la Humedad y Aireación de un

	Suelo Franco-Arcilloso. -----	42
4.1	Resumen. -----	42
4.2	Introducción. -----	43
4.3	Materiales y Métodos. -----	44
4.4	Resultados y Discusiones. -----	50
4.5	Conclusiones. -----	53
4.6	Literatura Citada. -----	53

Capítulo 5. Evaluación de los Parámetros de Trabajo del Rodillo Aireador	
en el Suelo. -----	56
5.1 Resumen. -----	56
5.2 Introducción. -----	56
5.3 Materiales y Métodos. -----	62
5.4 Resultados y Discusiones. -----	65
5.5 Conclusiones. -----	69
5.6 Literatura Citada. -----	70
Capítulo 6. Conclusiones Generales y Recomendaciones. -----	72
Capítulo 7. Anexos. -----	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.	Movimientos de traslación y rotación del rodillo aireador (adoptado de Klenin <i>et al.</i> , 1985). - - - - -	13
Figura 2.2.	Diagrama que describe el régimen cinemático del rodillo aireador (adoptado de Klenin <i>et al.</i> , 1985). - - - - -	14
Figura 2.3.	Trayectoria de la trocoide de la punta de una cuchilla del rodillo aireador (realizado en GeoGebra y adoptado de Klenin <i>et al.</i> , 1985).	15
Figura 2.4.	Coordenadas de la punta de la cuchilla (adoptado de Klenin <i>et al.</i> , 1985). - - - - -	16
Figura 2.5.	Tipos de trocoides obtenidos al variar el régimen cinemático (Klenin <i>et al.</i> , 1985). - - - - -	17
Figura 2.6.	Geometría de las cuchillas utilizadas. - - - - -	18
Figura 2.7.	Trocoides de las cuchillas cuadradas. - - - - -	20
Figura 2.8.	Trocoides de las cuchillas triangulares simétricas. - - - - -	22
Figura 2.9.	Trocoides de las cuchillas triangulares asimétricas. - - - - -	24
Figura 2.10.	Cantidad de suelo removido por las cuchillas del rodillo aireador en función del régimen cinemático. - - - - -	26

Figura 3.1. Cuchillas del rodillo aireador de forma triangular asimétrica (tipo 1). -----	32
Figura 3.2. Cuchillas del rodillo aireador de forma triangular simétrica (tipo 2). -----	32
Figura 3.3. Esfuerzos normales de la cuchilla tipo 1. -----	35
Figura 3.4. Deflexión del eje neutro de la cuchilla tipo 1. -----	36
Figura 3.5. Esfuerzos y deformación de la cuchilla tipo 2. -----	37
Figura 3.6. Deflexión del eje neutro de la cuchilla tipo 2. -----	38
Figura 4.1. Ubicación del experimento de campo y toma de muestras (https://maps.google.com.mx , 2014). -----	45
Figura 4.2. Cuchillas de forma triangular asimétrica con el corte en el borde diagonal. -----	45
Figura 4.3. Triángulo de texturas del suelo (Ortiz y Ortiz, 1990). -----	46
Figura 4.4. Humedad gravimétrica del suelo. -----	50
Figura 4.5. Humedad volumétrica del suelo. -----	50
Figura 4.6. Fracción de aire del suelo. -----	51
Figura 4.7. Densidad aparente del suelo. -----	51
Figura 4.8. Porosidad total del suelo. -----	52
Figura 4.9. Tasa de transferencia de difusión de Oxígeno en el suelo. -----	52
Figura 5.1. Fases del proceso de la compactación del suelo (Keller y Lamandé, 2012). -----	59
Figure 5.2. Efecto del peso de la maquinaria agrícola y de la humedad del suelo en la compactación del suelo (McKenzie, 2010). -----	60

Figura 5.3. Ubicación del experimento de campo y toma de muestras (https://maps.google.com.mx , 2014). -----	62
Figura 5.4. Cuchillas de forma triangular asimétrica con el corte en el borde diagonal. -----	63
Figura 5.5. Construcción del rodillo aireador. -----	63
Figura 5.6. Adición de contrapesos sobre el rodillo aireador. -----	64
Figura 5.7. Penetración de las cuchillas del rodillo aireador en el suelo. -----	65
Figura 5.8. Penetración de las cuchillas en el suelo con mayor humedad. -----	65
Figura 5.9. Penetración de las cuchillas en el suelo con mayor humedad, en función de la velocidad de trabajo. -----	66
Figura 5.10. Penetración de las cuchillas en el suelo con menor humedad. -----	67
Figura 5.11. Penetración de las cuchillas en el suelo con menor humedad, en función de la velocidad de trabajo. -----	67
Figura 5.12. Penetración de las cuchillas en el suelo al agregar una carga adicional de 200 kg en el implemento. -----	68
Figura 5.13. Penetración de las cuchillas en el suelo al agregar una carga adicional de 400 y 500 kg en el implemento. -----	68
Figura 7.1. Diseño del rodillo aireador. -----	76
Figura 7.2. Chasis para acoplar el rodillo aireador al enganche de tres puntos del tractor agrícola. -----	77
Figura 7.3. Rodillo aireador montado en el chasis. -----	78
Figura 7.4. Construcción del rodillo aireador. -----	79
Figura 7.5. Implemento del rodillo aireador enganchado en el tractor agrícola. -	79
Figura 7.6. Rodillo aireador en operación en el campo. -----	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Parámetros utilizados para calcular las trocoides del rodillo aireador.	18
Tabla 2.2. Distancias recorridas para una revolución del rodillo aireador. - - - - -	19
Tabla 2.3. Área de suelo removido por las cuchillas rectangulares en una revolución del rodillo aireador. - - - - -	21
Tabla 2.4. Área de suelo removido por las cuchillas triangulares simétricas en una revolución del rodillo aireador. - - - - -	23
Tabla 2.5. Área de suelo removido por las cuchillas triangulares asimétricas en una revolución del rodillo aireador. - - - - -	25
Tabla 3.1. Esfuerzos y deformaciones de las cuchillas. - - - - -	39
Tabla 4.1. Coeficientes de difusión molecular del Oxígeno (O ₂) y Dióxido de carbono (CO ₂) en función de la temperatura (Scott, 2000). - - - - -	49

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 INTRODUCCIÓN

La estructura del suelo es la forma en que están ordenados las partículas sólidas y los espacios ocupados por aire y agua. Los espacios de aire en el suelo son de gran importancia, ya que realizan diversas funciones, las cuales consisten en la distribución del aire, agua y nutrientes a través del suelo, y el anclaje de las raíces de las plantas para sostener un cultivo sano. La estructura ideal del suelo presenta una buena distribución y mezcla de microporos y macroporos, los macroporos regulan la entrada del agua y el drenaje, y los microporos almacenan el agua que ingresa al suelo, ya sea por las lluvias o por el riego (McKenzie, 2010).

La mayoría de los suelos están compuestos de aproximadamente un 50% de sólidos, constituido por arena, limo, arcilla y materia orgánica, y aproximadamente un 50% de espacio poroso (McKenzie, 2010). Tal distribución de los componentes del suelo, con el espacio poroso constituido por volúmenes iguales de humedad y aire, proporciona las condiciones ideales de humedad para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Kirkham y Powers, 1972). Con este considerable volumen del suelo ocupado, el aire y el agua juegan una de las partes más importantes en las relaciones del suelo y las plantas.

El aire en el suelo resulta importante debido a la respiración por las raíces de las plantas, éstas dependen del oxígeno en el suelo. Las raíces como los animales, no

fotosintetizan, y ambos emiten dióxido de carbono y recogen oxígeno durante la respiración. La difusión de los gases en el suelo prácticamente se detiene cuando la fracción de aire que llena a los poros es menor del 10% (Wesseling y van Wijk, 1957). Por consiguiente, las raíces necesitan al menos 10% por volumen de espacio de aire en el suelo para sobrevivir (Kirkham, 1994).

La habilidad del suelo para soportar la vegetación, depende principalmente de su adecuación como medio para el crecimiento de raíces (Núñez, 1999). Por su parte la habilidad de la raíz para encontrar espacio en el cual crecer o forzar su camino en el suelo, es a veces el factor limitante más importante para el crecimiento de la planta (Russell, 1973). Estas limitantes pueden resultar en una deficiente aireación y a un estrés de humedad o nutrimentos (Núñez, 1999).

La tendencia hacia el uso de maquinaria pesada, equipos de labranza y el tráfico vehicular sobre tierras agrícolas ha incrementado no solo la severidad de la compactación del suelo, sino además la profundidad a la cual ocurre esta (Håkansson *et al.*, 1987). El tráfico de los animales y maquinaria agrícola utilizados para las labores de labranza, reduce los espacios vacíos y aumenta la densidad del suelo. El pisoteo de caballos y bueyes utilizados en las labores agrícolas produce presiones sobre el suelo de hasta 150 y 250 kPa, respectivamente (Soane y Van Ouwerkerk, 1994). Estas presiones son al menos iguales o mayores que las causadas por un tractor de ruedas.

El grado de reducción de la porosidad del suelo causada por la labranza es suficiente para limitar la penetración de las raíces, y puede disminuir en forma significativa la permeabilidad al agua en el suelo. La reducción del espacio de poros afecta el movimiento del agua y la tenacidad de los suelos para la retención de agua, la expansión

de las raíces y el intercambio gaseoso de Oxígeno y Dióxido de Carbono con la atmósfera.

Si un poro se reduce diez veces de tamaño, la cantidad de agua que puede fluir a través del mismo en un tiempo dado será 10 000 veces menor. El tamaño de los poros para permitir el crecimiento y desarrollo normal de las raíces depende del tipo de cultivo, por ejemplo las raíces de los cereales pueden penetrar en los poros con diámetro de 0.1 a 1 mm, y las raíces de las dicotiledóneas requieren diámetros de 0.3 hasta 10 mm. En la agricultura mecanizada, los pisos de arado se forman generalmente a 12 - 30 cm de profundidad, dependiendo del implemento usado y de su profundidad normal de trabajo (McKenzie, 2010).

La compactación del suelo es la reducción del espacio poroso entre los agregados del suelo (McKenzie, 2010), es el incremento de la densidad aparente del suelo comparado de su estado no compactado (Bouma, 2012). La compactación del suelo es uno de los mayores problemas en la agricultura y representa una de las mayores amenazas a la calidad del suelo sustentable (Keller y Lamandé, 2012). El tráfico de los animales y la maquinaria utilizados en las actividades agrícolas representan la causa principal de la compactación del suelo (Lipiec, 2012). Un componente importante del daño progresivo en el subsuelo es el incremento del peso de la maquinaria agrícola en los últimos años (Håkansson, 2005; Schjønning *et al.*, 2009).

El proceso de compactación del suelo puede ser dividido en las siguientes fases (Keller y Lamandé, 2012):

- 1) el esfuerzo es ejercido en la superficie del suelo por las ruedas de la maquinaria agrícola,
- 2) el esfuerzo es propagado en el suelo,

- 3) el suelo se deforma como una reacción al esfuerzo, donde la deformación es dependiente de la resistencia mecánica del suelo, y
- 4) la deformación del suelo conduce a la modificación de la estructura del suelo y el sistema de poros.

El incremento en la densidad del suelo reduce su capacidad de permeabilidad y de infiltración, por lo que el agua de lluvia se desplaza sobre el suelo compactado por escurrimiento superficial y no puede ser aprovechada por las raíces de las plantas. La problemática de disminución de la aireación y absorción de agua derivada de la compactación superficial, ha llevado a la solución a través del diseño de un rodillo aireador constituido por cuchillas metálicas montadas en discos porta-cuchillas, los cuales a su vez son fijados equidistantemente en un eje montado en sus extremos a un chasis acoplado en el enganche de tres puntos del tractor.

El propósito de este implemento agrícola es mejorar la aireación y la difusión del oxígeno en el suelo, y la absorción e infiltración del agua de lluvia en el suelo a través de un laboreo vertical sin necesidad de voltear el prisma del suelo, para no alterar la estructura de los agregados del suelo y así evitar los problemas que origina la compactación del suelo, como ocurre en las actividades de labranza convencional.

Comercialmente, existen implementos agrícolas cuyas funciones son similares a la del equipo agrícola de estudio, tales como el rodillo aireador denominado AerWay desarrollado en Canadá, provisto de cuchillas las cuales pueden ser rígidas y flexibles, rectas y curvas, y equipados con resortes. Tiene un sistema hidráulico y ruedas para regular la profundidad de trabajo, y puede ser adaptado a diferentes equipos para abrir de grietas en el suelo para mejorar y renovar la aireación, e incrementar la absorción e infiltración del agua de lluvia en las diferentes actividades agrícolas, tales como en las

sembradoras, fertilizadoras, cosechadoras de forraje, podadoras, etc. (<http://www.aerway.com/index.php>). La presente investigación se enfoca en el análisis, diseño, construcción y evaluación de un rodillo aireador con cuchillas rígidas que pueden ser fácilmente intercambiables.

1.2 OBJETIVOS

Los objetivos del presente trabajo son los siguientes:

Objetivo general

- Desarrollar un rodillo aireador para mejorar la aireación del suelo e incrementar la infiltración del agua de lluvia en el suelo (análisis, diseño, construcción y evaluación).

Objetivos particulares

- Realizar el análisis cinemático del rodillo aireador en función de la geometría de las cuchillas y del régimen cinemático.
- Realizar el análisis de esfuerzo-deformación de las herramientas de corte.
- Construir el rodillo aireador a partir de los resultados de los análisis cinemático y mecánicos.
- Evaluar las propiedades físicas del suelo, tales como la difusión del oxígeno, la porosidad total, la humedad y aireación en el suelo.
- Evaluar la penetración de las cuchillas en el suelo en función de la velocidad de trabajo, humedad del suelo y carga vertical adicional.

1.3 HIPÓTESIS

El diseño, construcción y uso de un rodillo aireador permitirá mejorar la aireación, difusión del oxígeno, absorción e infiltración del agua de lluvia en el suelo, a través de un laboreo vertical sin voltear el prisma del suelo, para no degradar la estructura de los agregados del suelo, y acondicionará al suelo para realizar actividades de labranza de conservación y cero labranza (siembra directa).

En el Capítulo 2 se describe la teoría y las ecuaciones para modelar la cinemática de las herramientas de corte del rodillo aireador, y que debe ser considerada para el diseño y construcción de las cuchillas del rodillo aireador, para cumplir con las funciones de agrietar el suelo sin degradar la estructura de los agregados. Se desarrollaron las ecuaciones paramétricas y se obtuvieron las trayectorias de los elementos de corte del rodillo aireador en Geogebra (www.geogebra.org, 2014), para tres formas geométricas de las cuchillas y para valores de régimen cinemático menor, igual y mayor a la unidad.

En el Capítulo 3 se desarrollan las ecuaciones para caracterizar las propiedades mecánicas de las cuchillas del rodillo aireador en función de la geometría de estas, y con las mismas condiciones de carga aplicada y propiedades del material de construcción, se calculan numéricamente en Mathematica (www.wolfram.com, 2014) y gráficamente por elemento finito, los esfuerzos normales de tensión y de compresión, las deformaciones y la deflexión del eje neutro.

En el Capítulo 4 se desarrollan las ecuaciones que rigen la relación entre las propiedades físicas del suelo, tales como la humedad, densidad aparente, espacio poroso, y se determina la porosidad total, y las fracciones correspondientes de humedad y

aireación del suelo, para condiciones de suelo seco y húmedo, y uso del rodillo aireador en un suelo franco-arcilloso.

En el Capítulo 5 se describe la evaluación de los parámetros de trabajo de un rodillo aireador al interactuar con el suelo. Se determinan las combinaciones óptimas de carga vertical adicional, velocidad de trabajo, tipo de cuchillas, humedad del suelo, etc, que presentan los mejores indicadores de trabajo.

En el Capítulo 6 se describen las conclusiones generales y recomendaciones, y en el Capítulo 7 se presentan los anexos, los dibujos del diseño del prototipo del rodillo aireador.

1.4 LITERATURA CITADA

Bouma Johan. 2012. Soil compaction: Societal concerns and upcoming regulations. pp.

5-10. En: NJF seminar 448: Soil compaction – effects on soil functions and strategies for prevention. Nordic Association of Agricultural Scientists NJF Report, Vol 8 No (1) 2012. Helsinki, Finland. 120 p.

Håkansson I. 2005. Machinery-induced Compaction of Arable Soils, Incidence–Consequences–Counter-measures. Swedish University of Agricultural Sciences, Reports from the Division of Soil Management, No. 109.

Håkansson I.; Voorhees W. B.; Elonen P.; Raghavan G. S. V.; Lowery B.; Van Wijk A. L. M.; Rasmussen K.; Riley H. 1987. Effect of high axle-load traffic on subsoil compaction and crop yield in humid regions with annual freezing. Soil and Tillage Research. 10(3):259–268.

<http://www.aerway.com/index.php>

- Keller Thomas; Lamandé Mathieu. 2012. From soil stress to soil deformation: current state of the research. Pp. 19-21. En: NJF seminar 448: Soil compaction – effects on soil functions and strategies for prevention. Nordic Association of Agricultural Scientists NJF Report, Vol 8 No (1) 2012. Helsinki, Finland. 120 p.
- Kirkham D.; Powers W. L. 1972. Advanced Soil Physics. Wiley: New York.
- Kirkham M. B. 1994. Streamlines for diffusive flow in vertical and surface tillage: A model study. Soil Sci Soc Amer I 58:85-93.
- Lipiec J. 2012. Crop responses to soil compaction. Pp. 27-36. En: NJF seminar 448: Soil compaction – effects on soil functions and strategies for prevention. Nordic Association of Agricultural Scientists NJF Report, Vol 8 No (1) 2012. Helsinki, Finland. 120 p.
- McKenzie Ross H. 2010. Agricultural Soil Compaction: Causes and Management. Ph. D., P.Ag Agri-Facts.
- Núñez M. C. U. 1999. Efecto de la compactación del suelo sobre algunos parámetros morfológicos del desarrollo radical del maíz. Agronomía Tropical 49(1):93-106.
- Russell E. W. 1973. Soil conditions and plant growth. 10th edition. Longman Group Limited, London. 849 p.
- Schjønning P.; Heckrath G.; Christensen B. T. 2009. Threats to soil quality in Denmark: A review of existing knowledge in the context of the EU Soil Thematic Strategy. DJF Report Plant Science No. 143, The Faculty of Agricultural Sciences, Aarhus University.
- Soane B. D.; van Ouwerkerk C. 1994. Soil compaction problems in world agriculture. En: Soil compaction in crop production, p. 1-21. Eds. B. D. Soane y C. van Ouwerkerk. Holanda. Elsevier Science.

Wesseling J.; van Wijk W. R. 1957. Soil physical conditions in relation to drain depth.
Drainage of Agricultural Lands (Luthin, J. N., Ed.), pp. 461-504. American Society
of Agronomy.

www.geogebra.org. 2014. A GeoGebra Tutorial.

www.wolfram.com. 2014. Mathematica Tutorial.

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE DE UN RODILLO AIREADOR

2.1 RESUMEN

La labranza vertical tiene como objetivo el romper las capas de suelo compactadas sin perturbar la estructura de los agregados del suelo, es decir, sin voltear la tierra. Al romper las capas de suelo compactadas, se logra una mejor filtración del agua a través del suelo, lo que evita el encharcamiento superficial, facilitando el que la humedad se quede en el interior del terreno, donde los cultivos la necesitan. En este trabajo se presenta el análisis del movimiento de las herramientas de corte de un rodillo aireador, para mejorar la aireación y la captación del agua de lluvia en el suelo, a partir del agrietamiento superficial sin voltear el prisma del suelo, para no degradar la estructura de los agregados, similar a la labranza vertical. Se desarrollaron las ecuaciones paramétricas y se obtuvieron las trocoides de las cuchillas del rodillo aireador en Geogebra. Las áreas longitudinales bajo el suelo y los volúmenes de las grietas de las cuchillas se calcularon en AutoCad. Se consideraron cuchillas de forma rectangular, triangular simétrica y triangular asimétrica, para regímenes cinemáticos de 0.8, 1.0 y 1.2.

Palabras clave: Régimen cinemático, cuchillas, rodillo aireador, labranza vertical.

2.2 INTRODUCCIÓN

La habilidad del suelo para soportar la vegetación, depende principalmente de su adecuación como medio para el crecimiento de raíces (Núñez, 1999). Por su parte, la habilidad de la raíz para encontrar espacio en el cual crecer o forzar su camino en el suelo, es a veces el factor limitante más importante para el crecimiento de la planta (Russell, 1973). Estas limitantes, pueden resultar en una deficiente aireación y en un estrés de humedad o nutrimentos (Núñez, 1999).

El tráfico de los animales y la maquinaria utilizados en las actividades de labranza convencional representan la causa principal de la compactación del suelo (Lipiec, 2012), y el incremento del peso de la maquinaria agrícola en los últimos años es el principal factor que produce la degradación de los agregados en el subsuelo (Håkansson, 2005; Schjønning *et al.*, 2009).

La remoción del suelo de las actividades de labranza convencional produce diversos efectos negativos en el suelo relacionados con la compactación, tales como 1) la pérdida de la humedad del suelo por la rotura del prisma del suelo, 2) disminución del contenido de materia orgánica, 3) pérdida de los canales continuos producidos por las raíces y de los macroporos, 4) reducción de la infiltración del agua de lluvia, 5) la erosión se multiplica diez veces, 6) mayor susceptibilidad y prolongación de la temporada de sequía, 7) esterilización de la vida del suelo, principalmente la mesofauna y los microorganismos, 8) costos adicionales de preparación del suelo y de la construcción de las curvas de nivel, 9) retrasos en la siembra, 10) incremento de la inversión en maquinarias (FAO, 2004).

La labranza vertical es un tipo de labranza de conservación que mejora la aireación y la infiltración del agua de lluvia en el suelo sin necesidad de voltear el prisma del

suelo, por lo cual no degrada la estructura de los agregados ni produce los efectos negativos que se derivan de ésta, como sucede en la labranza convencional.

La utilización de un rodillo aireador provisto de cuchillas es una alternativa viable para incrementar la aireación y la infiltración del agua de lluvia en el suelo después de la cosecha del ciclo agrícola anterior, y permite acondicionar las propiedades físicas del suelo para implementar posteriormente sistemas de labranza mínima y de conservación.

El diseño del rodillo aireador que realice las funciones de la labranza vertical, considera el movimiento de rotación en las herramientas de corte definido por el avance del implemento sobre el suelo, donde los elementos de corte únicamente hacen una grieta en el suelo.

En Canadá ha sido desarrollado un rodillo aireador provisto de cuchillas denominado AerWay (<http://www.aerway.com/index.php>, 2014), sin embargo no proporciona información referente al régimen cinemático ni al tamaño de las grietas.

En este trabajo se describe el análisis cinemático de un rodillo aireador provisto de cuchillas. Se desarrollaron las ecuaciones paramétricas y se obtuvieron las trocoides de las cuchillas del rodillo aireador en Geogebra (www.geogebra.org, 2014), las cuales incluyen los movimientos de rotación respecto al eje del rodillo aireador, y de traslación sobre el terreno en función de la velocidad de avance. Las áreas longitudinales bajo el suelo y los volúmenes de las grietas de las cuchillas se calcularon en AutoCad (www.autodesk.mx, 2014). Se consideraron cuchillas de forma rectangular, triangular simétrica y triangular asimétrica, y regímenes cinemáticos de 0.8, 1.0 y 1.2 (Klenin *et al.*, 1985).

Los resultados del análisis cinemático proporcionan los criterios y fundamentos teóricos que deben ser considerados en el diseño y construcción de las cuchillas

metálicas y su disposición en el rodillo aireador, en función de los parámetros agrotécnicos, tales como la velocidad de trabajo, la profundidad de corte, el ancho de trabajo del rodillo aireador y/o número de discos porta-cuchillas, humedad y resistencia del suelo, entre otros.

2.3 MATERIALES Y MÉTODOS

Las herramientas de corte del rodillo aireador están dispuestas en discos porta-cuchillas montados de forma equidistante en un eje sólido. Las cuchillas del rodillo aireador presentan movimiento de traslación y de rotación al mismo tiempo (Figura 2.1).

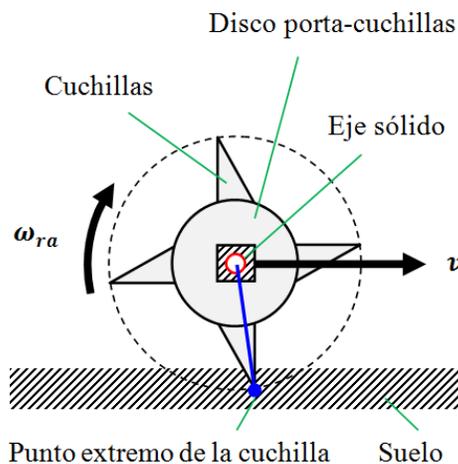


Figura 2.1. Movimientos de traslación y rotación del rodillo aireador (adoptado de Klenin *et al.*, 1985).

El rodillo aireador gira desde la posición inicial del centro del eje (o) en la dirección de avance (x) en una distancia (vt) a la posición final ($o1$). La punta de una cuchilla gira respecto al centro del eje desde la posición inicial (A) que coincide con el eje (x) en un lapso de tiempo (t) a la posición final ($A1$). Las proyecciones del centro del eje con la punta de la cuchilla al inicial y al final del giro del rodillo aireador forman un ángulo, el

cual incrementa desde cero en la posición inicial hasta (ωt) en la posición final (Figura 2.2).

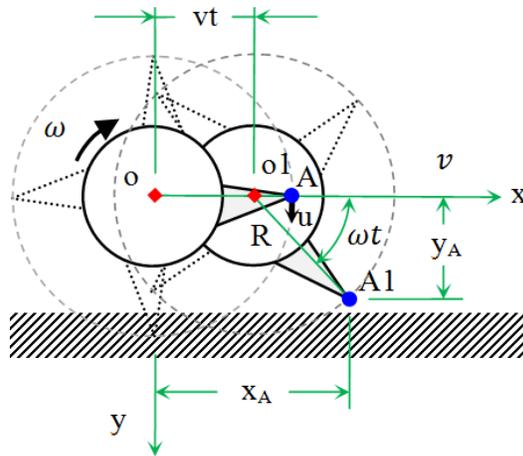


Figura 2.2. Diagrama que describe el régimen cinemático del rodillo aireador (adoptado de Klenin *et al.*, 1985).

donde v = la velocidad de avance del rodillo aireador ($m s^{-1}$), vt = el desplazamiento en el eje x (m), ω = la velocidad angular ($rad s^{-1}$), ωt = el ángulo que forman las proyecciones del centro del eje con la punta de la cuchilla entre la posición inicial y la posición final del giro ($rad s^{-1}$), u = la velocidad circular de la punta de la cuchilla ($m s^{-1}$), R = el radio del rodillo aireador (m), o = la posición del centro del rodillo aireador al inicio del giro, cuyas coordenadas son $0,0$ (m), $o1$ = la posición del centro del rodillo aireador al final del giro, cuyas coordenadas son $vt, 0$ (m), A = la posición de la punta de la cuchilla al inicio del giro, cuyas coordenadas son $R, 0$ (m), $A1$ = la posición de la punta de la cuchilla al final del giro, cuyas coordenadas son x_A, y_A (m), t = el tiempo (s).

La trayectoria de la trocoide formada por las coordenadas de la punta de la cuchilla al pasar de (A) a $(A1)$, se establece con las Ecuaciones paramétricas 2.1 y 2.2:

$$X_A = vt + R \cdot \cos \omega t \quad (2.1)$$

$$Y_A = R \cdot \sin \omega t \quad (2.2)$$

donde X_A = el vector con las coordenadas longitudinales de la trayectoria de la trocoide (m), Y_A = el vector con las coordenadas verticales de la trayectoria de la trocoide (m).

La Figura 2.3 muestra la trayectoria de la trocoide que forma un punto de la circunferencia, y que representa la punta de una cuchilla al rotar respecto al eje portacuchillas y al trasladarse en la dirección de avance.

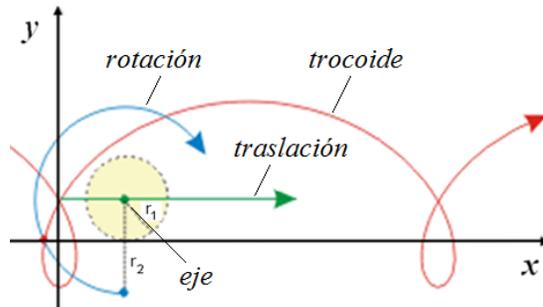


Figura 2.3. Trayectoria de la trocoide de la punta de una cuchilla del rodillo aireador (realizado en GeoGebra y adoptado de Klenin *et al.*, 1985).

Si la velocidad circular de la punta de una cuchilla es u y el ángulo $\omega t = \theta$, sin que exista avance lineal sobre x , se cumplen las siguientes condiciones:

$$u = \omega R \quad (2.3)$$

$$t = \frac{\theta}{\omega} \quad (2.4)$$

$$t = \frac{\theta R}{u} \quad (2.5)$$

A partir de la cinemática que presenta el rodillo al interactuar con el terreno, se establecen las coordenadas de la punta de la cuchilla (Figura 2.4).

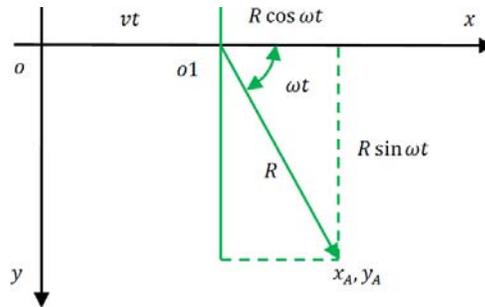


Figura 2.4. Coordenadas de la punta de la cuchilla (adoptado de Klenin *et al.*, 1985).

Las coordenadas de la punta de la cuchilla en función de θ se calculan con las Ecuaciones 2.6 y 2.7:

$$X_A = vt + R \cdot \cos \theta = R \left(\frac{v\theta}{u} + \cos \theta \right) \quad (2.6)$$

$$Y_A = R \cdot \sin \theta \quad (2.7)$$

El régimen cinemático es la relación de la velocidad de avance y la velocidad circular, y se expresa con la Ecuación 2.8:

$$\lambda = \frac{u}{v} \quad (2.8)$$

donde λ = el régimen cinemático (adim).

Sustituyendo (2.8) en (2.6) se obtiene la coordenada longitudinal de la punta de la cuchilla en función de la posición angular y el régimen cinemático (Ecuación 2.9):

$$X_A = R \left(\frac{\theta}{\lambda} + \cos \theta \right) \quad (2.9)$$

La Ecuación 2.9 expresa la trayectoria de la velocidad absoluta de la punta de la cuchilla, definiendo un trocoide, cuya forma se rige por el régimen cinemático (Figura 2.5).

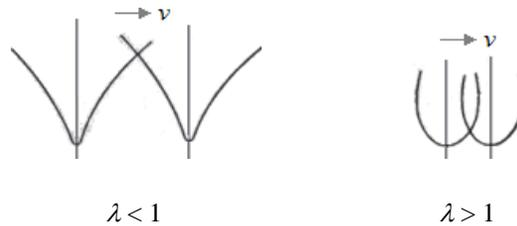


Figura 2.5. Tipos de trocoides obtenidos al variar el régimen cinemático (Klenin *et al.*, 1985).

La distancia recorrida por el rodillo en una revolución se calcula con la Ecuación 2.10:

$$L = 2 \cdot \pi \cdot R' \quad (2.10)$$

donde L = distancia recorrida por el rodillo en una revolución (cm), R' = radio de referencia (cm).

El radio de referencia es un valor de entrada requerido en el software de GeoGebra, el cual se calcula como el cociente del radio del rodillo y el régimen cinemático (Ecuación 2.11):

$$R' = \frac{R}{\lambda} \quad (2.11)$$

donde R = radio del rodillo ($R = 30$ cm).

Para determinar las trayectorias y los rastros de las cuchillas del rodillo aireador, se consideraron las siguientes características (Tabla 2.1):

Tabla 2.1. Parámetros utilizados para calcular las trocoides del rodillo aireador.

Forma de las cuchillas (Figura 2.6)	Rectangular Triangular simétrica Triangular asimétrica
Régimen cinemático	$\lambda = 0.8, 1.0, 1.2$
Radio del rodillo aireador:	$R = 30$ cm
Espesor de las cuchillas:	1 cm
Cantidad de cuchillas por cuerpo:	4 cuchillas
Profundidad de corte:	15 cm

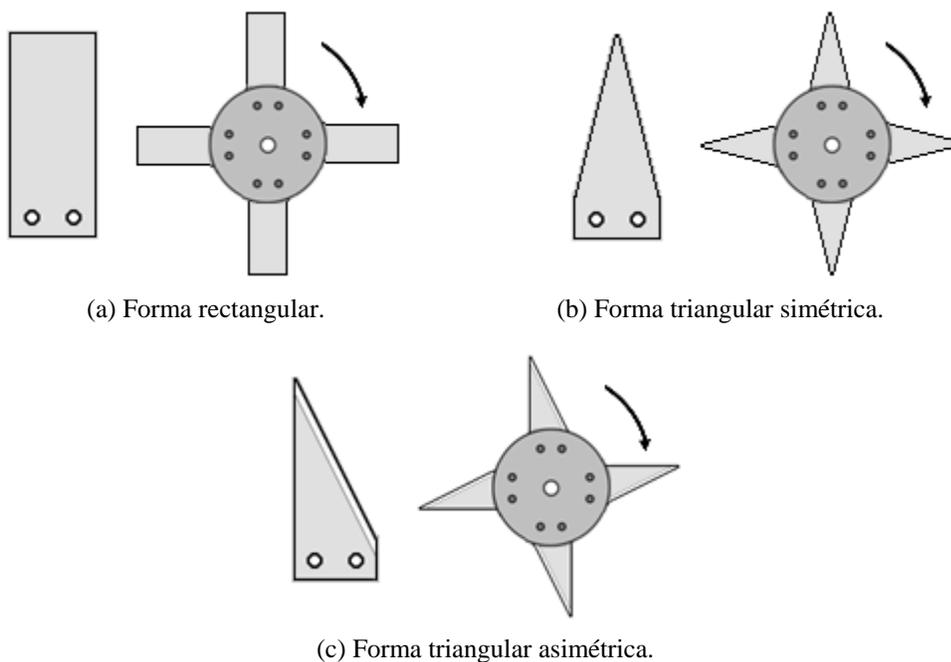


Figura 2.6. Geometría de las cuchillas utilizadas.

Para la simulación se utilizó el programa Geogebra. Las áreas que cubren las herramientas de corte bajo el nivel del suelo en una revolución del rodillo aireador, fueron calculadas en AutoCad.

2.4 RESULTADOS Y DISCUSIONES

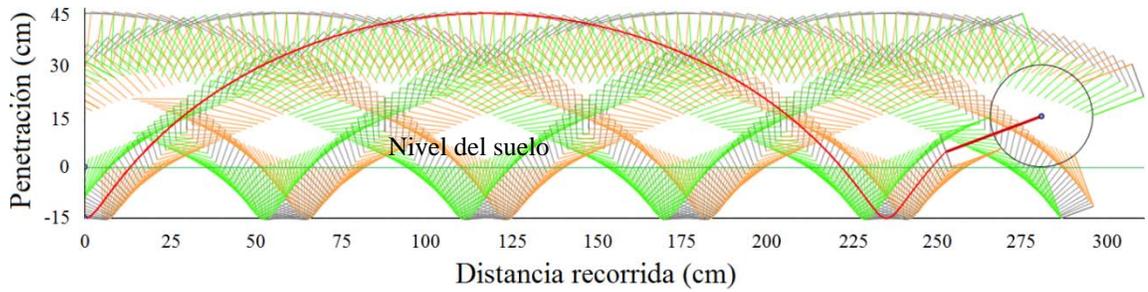
La Tabla 2.2 presenta las distancias recorridas para una revolución del rodillo aireador en función del régimen cinemático:

Tabla 2.2. Distancias recorridas para una revolución del rodillo aireador.

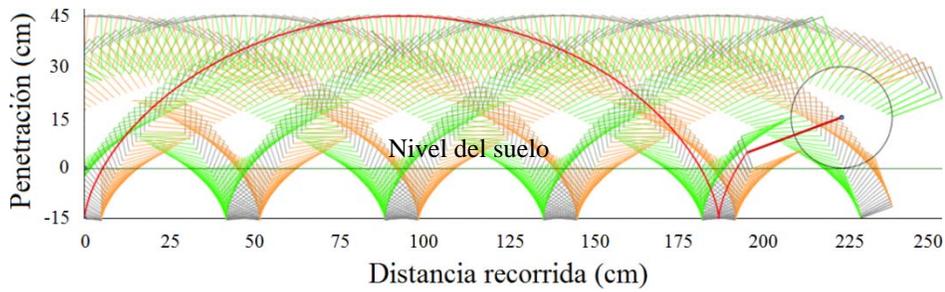
Régimen cinemático, λ (cm)	Radio del rodillo aireador, R (cm)	Radio de referencia, R' (cm)	Distancia de una revolución, L (cm)
0.8	30	37.5	235.6
1.0	30	30	188.5
1.2	30	25	157.1

La distancia recorrida en el mismo tiempo por los rodillos se comportó de forma inversa al régimen cinemático, de esta forma, al cambiar el régimen cinemático de la unidad a 0.8, la distancia recorrida incrementó en 25%, y disminuyó en 16.7% al cambiar el régimen cinemático a 1.2.

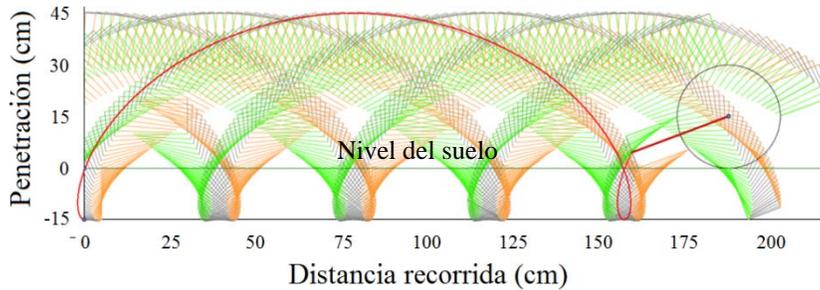
La Figura 2.7 presenta las trocoides de las cuchillas triangulares cuadradas para una revolución del rodillo, asumiendo que no se presenta patinaje ni deslizamiento.



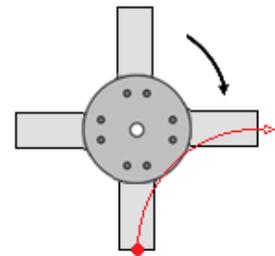
(a) $\lambda = 0.8$.



(b) $\lambda = 1.0$.



(c) $\lambda = 1.2$



(d) Trocoide de una cuchilla utilizada.

Figura 2.7. Trocoides de las cuchillas cuadradas.

La trayectoria en color rojo (Figuras 2.7a-c) es la trocoide de un cuadrante del rodillo aireador, el cual coincide con la mitad de la punta de una cuchilla (Figura 2.7d).

La Tabla 2.3 muestra el área de suelo removido por las cuchillas cuadradas en una revolución del rodillo aireador.

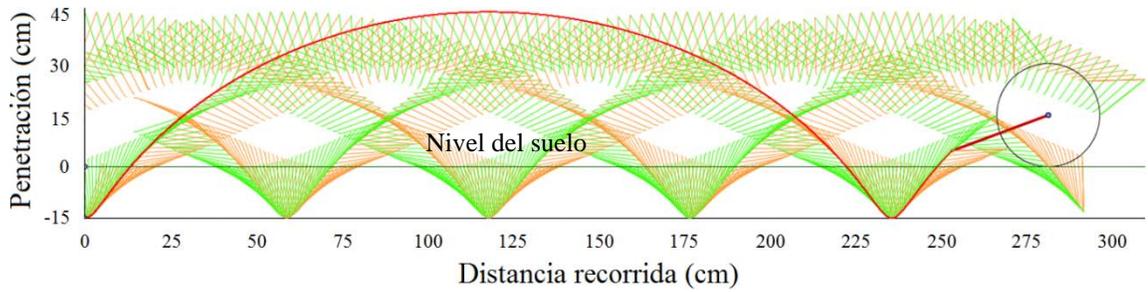
Tabla 2.3. Área de suelo removido por las cuchillas rectangulares en una revolución del rodillo aireador.

λ	1 rev	Suelo removido		
		por rev	por metro	por ciento
(adim)	(m)	(m ²)	(m ² m ⁻¹)	(%)
0.8	2.36	0.1761	0.0747	49.8
1.0	1.88	0.1126	0.0598	39.8
1.2	1.57	0.0826	0.0526	35.1

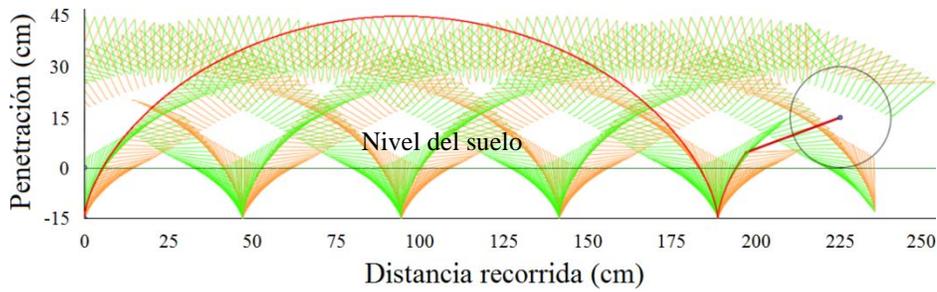
Al utilizar un rodillo con diámetro de 60 cm e incrementar el régimen cinemático de 0.8 a 1.2, la distancia de una revolución disminuyó en 33.5%, y la cantidad de suelo removido también disminuyó en la misma proporción.

Al trabajar el rodillo aireador con cuchillas rectangulares a una profundidad de penetración de 15 cm, en el régimen cinemático de 0.8 el rodillo aireador removió el suelo en un 50% (1/2), es decir, la mitad de suelo quedó removido y la otra mitad no fue alterado. Al incrementar el régimen cinemático a la unidad, el suelo removido fue de 40% (2/5) y en el régimen cinemático de 1.2, el suelo removido fue de 35% (1/3).

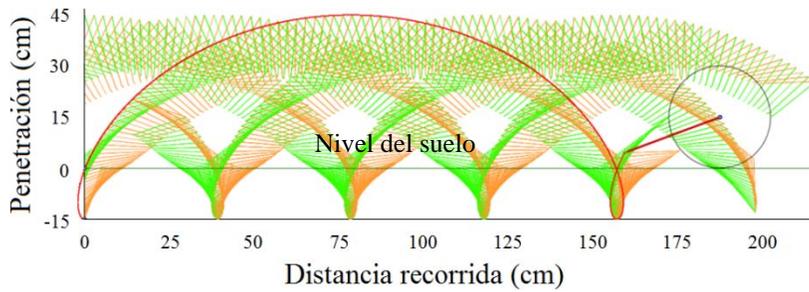
La Figura 2.8 presenta las trocoides de las cuchillas triangulares simétricas para una revolución del rodillo, asumiendo que no se presenta patinaje ni deslizamiento.



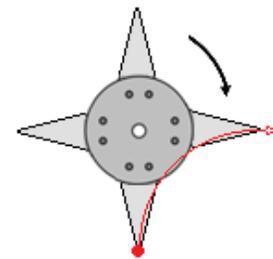
(a) $\lambda = 0.8$.



(b) $\lambda = 1.0$.



(c) $\lambda = 1.2$



(d) Trocoide de una cuchilla utilizada.

Figura 2.8. Trocoides de las cuchillas triangulares simétricas.

La trayectoria en color rojo (Figuras 2.8a-c) es la trocoide de un cuadrante del rodillo aireador, el cual coincide con la punta de una cuchilla (Figura 2.8d).

La Tabla 2.4 muestra el área de suelo removido por las cuchillas triangulares simétricas en una revolución del rodillo aireador.

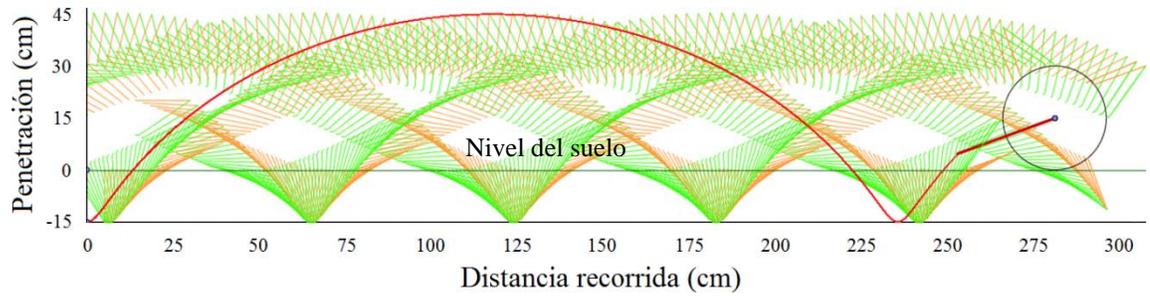
Tabla 2.4. Área de suelo removido por las cuchillas triangulares simétricas en una revolución del rodillo aireador.

λ (adim)	1 rev (m)	Suelo removido		
		por rev (m ²)	por metro (m ² m ⁻¹)	por ciento (%)
0.8	2.36	0.1126	0.0477	31.8
1.0	1.88	0.0684	0.0364	24.3
1.2	1.57	0.0502	0.0320	21.3

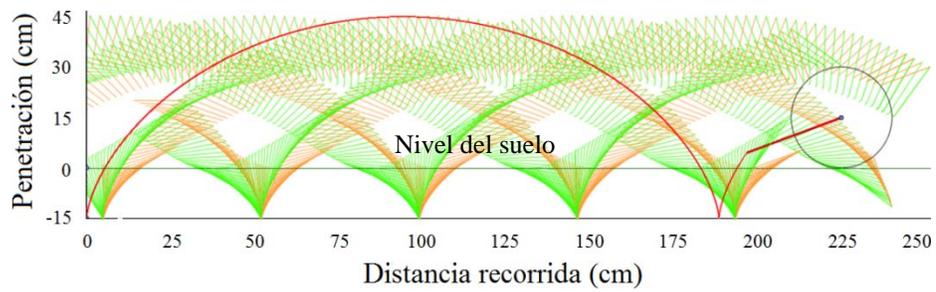
Al utilizar un rodillo con diámetro de 60 cm e incrementar el régimen cinemático de 0.8 a 1.2, la distancia de una revolución disminuyó en 33.5%, y la cantidad de suelo removido también disminuyó en la misma proporción.

Al trabajar el rodillo aireador con cuchillas triangulares simétricas a una profundidad de penetración de 15 cm, en el régimen cinemático de 0.8 el rodillo aireador removió el suelo en un 32% (1/3), es decir, un tercio de suelo quedó removido y dos tercios no fueron alterados. Al incrementar el régimen cinemático a la unidad, el suelo removido fue de 24% (1/4) y en el régimen cinemático de 1.2, el suelo removido fue de 21% (1/5).

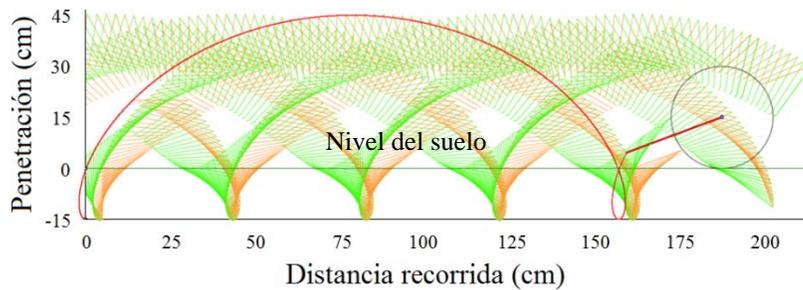
La Figura 2.9 presenta las trocoides de las cuchillas triangulares asimétricas para una revolución del rodillo, asumiendo que no se presenta patinaje ni deslizamiento.



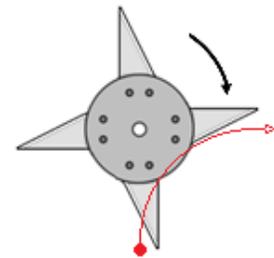
(a) $\lambda = 0.8$.



(b) $\lambda = 1.0$.



(c) $\lambda = 1.2$



(d) Trocoide de una cuchilla utilizada.

Figura 2.9. Trocoides de las cuchillas triangulares asimétricas.

La trayectoria en color rojo (Figuras 2.9a-c) es la trocoide de un cuadrante del rodillo aireador, el cual se ubica al frente del giro de la punta de una cuchilla (Figura 2.9d).

La Tabla 2.5 muestra el área de suelo removido por las cuchillas triangulares asimétricas en una revolución del rodillo aireador.

Tabla 2.5. Área de suelo removido por las cuchillas triangulares asimétricas en una revolución del rodillo aireador.

λ (adim)	1 rev (m)	Suelo removido		
		por rev (m ²)	por metro (m ² m ⁻¹)	por ciento (%)
0.8	2.36	0.1163	0.0493	32.9
1.0	1.88	0.0698	0.0371	24.8
1.2	1.57	0.0529	0.0337	22.5

Al utilizar un rodillo con diámetro de 60 cm e incrementar el régimen cinemático de 0.8 a 1.2, la distancia de una revolución disminuyó en 33.5%, y la cantidad de suelo removido también disminuyó en la misma proporción.

Al trabajar el rodillo aireador con cuchillas triangulares asimétricas a una profundidad de penetración de 15 cm, en el régimen cinemático de 0.8 el rodillo aireador removió el suelo en un 33% (1/3), es decir, un tercio de suelo quedó removido y dos tercios no fueron alterados. Al incrementar el régimen cinemático a la unidad, el suelo removido fue de 25% (1/4) y en el régimen cinemático de 1.2, el suelo removido fue de 22% (1/5).

La Figura 2.10 muestra el porcentaje de suelo removido por las diferentes cuchillas utilizadas del rodillo aireador al cambiar el régimen cinemático.

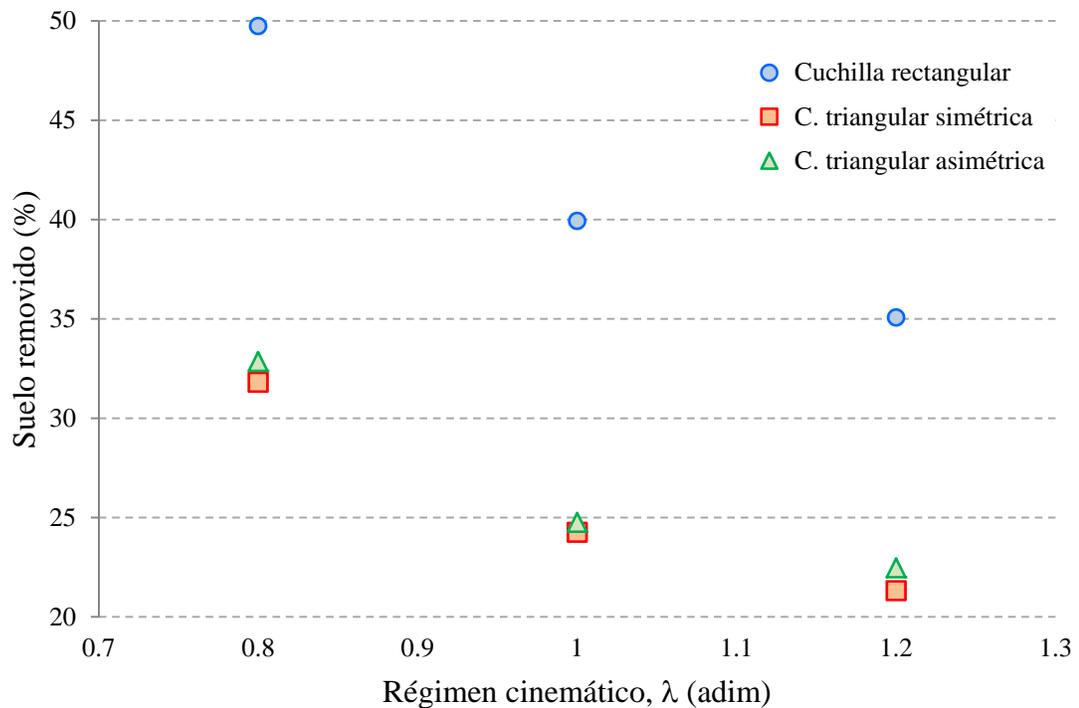


Figura 2.10. Cantidad de suelo removido por las cuchillas del rodillo aireador en función del régimen cinemático.

El área de suelo removido es proporcional a la superficie de las cuchillas, en este caso, las cuchillas triangulares simétricas y asimétricas tuvieron superficies iguales, y la mitad de la superficie de las cuchillas rectangulares.

Al cambiar en el rodillo aireador las cuchillas rectangulares a cuchillas triangulares, el suelo removido disminuyó en 35% en el régimen cinemático de 0.8, en 38% en el régimen cinemático de 1.0, y en 37% en el régimen cinemático de 1.2 (Figura 2.10)

Cuando el régimen cinemático fue menor a la unidad, las áreas de contacto de las cuchillas bajo el suelo alcanzaron valores máximos debido a que las trocoides no

presentaron cruzamiento, por otra parte, cuando el régimen cinemático fue mayor a la unidad, las áreas de contacto de las cuchillas bajo el suelo alcanzaron valores mínimos debido a que las trocoides presentaron cruzamiento o traslape, donde la cuchilla remueve el suelo tanto al entrar como al salir, por lo cual el área de suelo removido disminuyó.

En las cuchillas triangulares asimétricas, el corte puede ir en el borde recto o en el borde diagonal de la cuchilla, y el ángulo de entrada es menor cuando el corte se encuentra en el borde recto, por lo cual es más recomendable utilizar este tipo de cuchillas asimétricas para aprovechar el peso del rodillo para agrietar el suelo.

Cuando la profundidad de penetración de la cuchilla es igual al radio del rodillo aireador, en el régimen cinemático igual a la unidad, el ángulo de entrada al suelo fue de 60° respecto a eje vertical que pasa por el centro del rodillo.

2.5 CONCLUSIONES

Las herramientas de labranza vertical deben realizar una hendidura en el suelo de volumen considerable para retener la mayor cantidad de agua posible. Si el suelo presenta una compactación baja se pueden utilizar cuchillas rectas y un régimen cinemático entre 0.8 y 1.2, y si aumenta la compactación del suelo se pueden utilizar cuchillas triangulares con un régimen cinemático entre 0.8 y 1.0.

El área de suelo removido incrementa al disminuir el régimen cinemático, y la función del rodillo es hacer una cavidad en el suelo para incrementar la aireación y la capacidad de retención del agua de lluvia, en este sentido se recomienda utilizar un régimen cinemático menor a la unidad.

Es recomendable obtener un ángulo de entrada al suelo de la cuchilla respecto al eje vertical menor de 45° , para aprovechar el peso del implemento.

Una forma de incrementar el tamaño de las grietas y mantener la misma resistencia del implemento, consiste en reducir la cantidad de cuchillas por cuerpo e incrementar el régimen cinemático, a partir de la unidad, o incrementar el número cuchillas y reducir el régimen cinemático.

2.6 LITERATURA CITADA

FAO. 2004. Desarrollo de la siembra directa en el Brasil tropical. FAO Agricultural Services Bulletin No. 147.

Håkansson I. 2005. Machinery-induced Compaction of Arable Soils, Incidence–Consequences–Counter-measures. Swedish University of Agricultural Sciences, Reports from the Division of Soil Management, No. 109.

Håkansson I.; Voorhees W. B.; Elonen P.; Raghavan G. S. V.; Lowery B.; Van Wijk A. L. M.; Rasmussen K.; Riley H. 1987. Effect of high axle-load traffic on subsoil compaction and crop yield in humid regions with annual freezing. Soil and Tillage Research. 10(3):259–268.

<http://www.aerway.com/index.php>

Klenin Nikolai Ivanovich, Popov Ilia Fedorovich, Sakun Viacheslav Aleksandrovich. 1985. Agricultural Machines: Theory of Operation, Computation of Controlling Parameters, and the Conditions of Operation. 633 p.

Lipiec J. 2012. Crop responses to soil compaction. Pp. 27-36. En: NJF seminar 448: Soil compaction – effects on soil functions and strategies for prevention. Nordic Association of Agricultural Scientists NJF Report, Vol 8 No (1) 2012. Helsinki, Finland. 120 p.

Núñez M. C. U. 1999. Efecto de la compactación del suelo sobre algunos parámetros morfológicos del desarrollo radical del maíz. *Agronomía Tropical* 49(1):93-106.

Russell E. W. 1973. *Soil conditions and plant growth*. 10th edition. Longman Group Limited, London. 849 p.

Schjønning P.; Heckrath G.; Christensen B. T. 2009. Threats to soil quality in Denmark: A review of existing knowledge in the context of the EU Soil Thematic Strategy. DJF Report Plant Science No. 143, The Faculty of Agricultural Sciences, Aarhus University.

www.autodesk.mx. 2014

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE ESFUERZOS DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE DE UN RODILLO AIREADOR

3.1 RESUMEN

En la interacción de las herramientas de labranza con el suelo, el material de construcción de las cuchillas debe tener ciertas propiedades mecánicas para hacer frente a las resistencias que opone el suelo. La resistencia de elemento de corte debe tener la capacidad para romper el suelo, y al mismo tiempo debe tener cierta deformación elástica para evitar fracturas y daños debido a las condiciones no homogéneas de las propiedades físicas del suelo. En este trabajo se evaluaron las propiedades mecánicas de las cuchillas del rodillo aireador de forma numérica y por elemento finito, en función de las formas geométricas y del material de las cuchillas. Se calcularon los esfuerzos y las deformaciones de las cuchillas de forma triangular simétrica y asimétricas. Las cuchillas de geometría asimétrica presentaron diferencias en los esfuerzos normales de tensión y compresión, y en las deformaciones, resultando en una mayor deflexión del eje neutro, lo cual permite a este tipo de cuchillas un buen desempeño en suelos con propiedades físicas no homogéneas, lo cual es muy común en los suelos agrícolas. Las cuchillas de geometría simétrica mostraron uniformidad en los esfuerzos de tensión y de compresión, y en las deformaciones, resultando en una rigidez mayor del eje neutro, por lo cual este

tipo de cuchilla es más susceptible a la fatiga o incluso a rupturas en condiciones cíclicas de operación y en suelos compactados.

Palabras clave: Esfuerzo, deformación, cuchillas, elemento finito.

3.2 INTRODUCCIÓN

En las operaciones de labranza y remoción del suelo, las herramientas de corte al interactuar con el suelo son sometidos a esfuerzos de tensión y compresión debidos a las resistencias a la abrasión, de corte y de penetración por la compactación del suelo, cuyas magnitudes dependen de las condiciones de operación y de las propiedades del suelo (Håkansson *et al.*, 1987).

Las condiciones de operación que son función de los esfuerzos de tensión y compresión de las herramientas de corte son la profundidad de corte, la velocidad de trabajo, el volumen de suelo a remover, el tiempo de trabajo, la carga aplicada para la penetración y la geometría de las herramientas de corte (Artilugio y Guardado, 1993). Las propiedades del suelo que afectan el desempeño de los elementos de corte en el suelo son la humedad, la estructura de los agregados, la textura del suelo, la densidad aparente y compactación, entre otros (Artilugio y Guardado, 1993).

Al interactuar con el suelo, las herramientas de corte en un inicio se deforman dentro del límite elástico, pero al exceder los esfuerzos críticos por las elevadas resistencias de abrasión, de corte y penetración en el suelo, las cuchillas se deforman plásticamente, por lo cual disminuyen la calidad de trabajo e incluso pueden alcanzar los límites de fractura. (Keller y Lamandé, 2012, Viniegra, 2011; Delgado, 1957).

En este trabajo se desarrollaron las ecuaciones para evaluar el desempeño mecánico de un rodillo aireador. Se utilizaron cuchillas de forma triangular asimétrica (Figura 3.1), y las cuchillas de forma triangular simétrica (Figura 3.2).

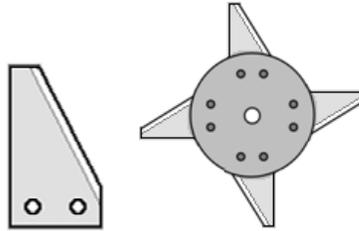


Figura 3.1. Cuchillas del rodillo aireador de forma triangular asimétrica (tipo 1).

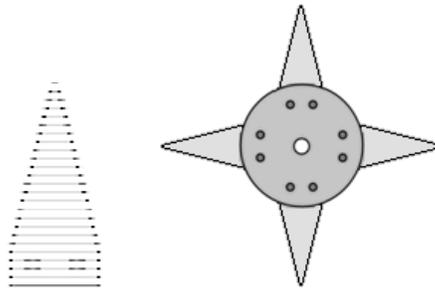


Figura 3.2. Cuchillas del rodillo aireador de forma triangular simétrica (tipo 2).

3.3 MATERIALES Y MÉTODOS

Momento de inercia

El momento de inercia del elemento de corte, se calcula con la Ecuación 3.4a para la cuchilla tipo 1, y con la Ecuación 3.4b para la cuchilla tipo 2 (Timoshenko y Goodier, 1951; Sokolnikoff, 1951).

$$I_{xx(tot)} = \frac{b}{3} \left\{ h^3 - 3h^2r + 3hr^2 + \left[r^3 + \left(\frac{h-r}{l-s_1} \cdot x + h-r \right)^3 \right] \right\} \quad (3.4a)$$

$$I_{xx(tot)} = \frac{b}{12} \left\{ h^3 + \left(\frac{\frac{h-h_i}{s_2} \cdot x + h}{2} \right)^3 \right\} \quad (3.4b)$$

donde I_{xx} = el momento de inercia (kg m^2), b = la base o lado opuesta a la punta de la cuchilla (m), h = la longitud de la cuchilla, r = el radio de la cuchilla o distancia del centro del rodillo a la punta de la cuchilla (m).

Esfuerzo normal

El esfuerzo normal del elemento de corte, se calcula con la Ecuación 3.5a para la cuchilla tipo 1, y con la Ecuación 3.5b para la cuchilla tipo 2 (Timoshenko y Goodier, 1951; Sokolnikoff, 1951):

$$\sigma_x = \frac{3P(l-x)y}{b \left\{ h^3 - 3h^2r + 3hr^2 + \left[r^3 + \left(\frac{h-r}{l-s_1} \cdot x + h - r \right)^3 \right] \right\}} \quad (3.5a)$$

$$\sigma_x = \frac{6F(l-x)}{b \left(\frac{h-h_i}{s_2} \cdot x + h \right)^3} \quad (3.5b)$$

donde σ_x = el esfuerzo normal (Mpa), P = la carga puntual aplicada (N).

Deflexión de la cuchilla

La deflexión del eje neutro del elemento de corte, se calcula con la Ecuación 3.6a para la cuchilla tipo 1, y con la Ecuación 3.6b para la cuchilla tipo 2 (Timoshenko y Goodier, 1951; Sokolnikoff, 1951):

$$v = - \frac{Fl^3}{Eb \left\{ h^3 - 3h^2r + 3hr^2 + \left[r^3 + \left(\frac{h-r}{l-s_1} \cdot x + h - r \right)^3 \right] \right\}} \quad (3.6a)$$

$$v = - \frac{32Fl^3}{Eb \left(\frac{h-h_i}{s_2} \cdot x + h \right)^3} \quad (3.6b)$$

donde v = la deflexión del eje neutro de la cuchilla (m), E = el módulo de elasticidad del material de la cuchilla (GPa).

Deformación de la cuchilla

Aplicando la Ley de Hooke, las deformaciones en cualquier parte del elemento de corte, se calculan con la Ecuación 3.7a para la cuchilla tipo 1 y con la Ecuación 3.7b para la cuchilla tipo 2 (Timoshenko y Goodier, 1951; Sokolnikoff, 1951):

$$\varepsilon_x = \frac{3P(l-x)y}{Eb \left\{ h^3 - 3h^2r + 3hr^2 + \left[r^3 + \left(\frac{h-r}{l-s_1} \cdot x + h-r \right)^3 \right] \right\}} \quad (3.7a)$$

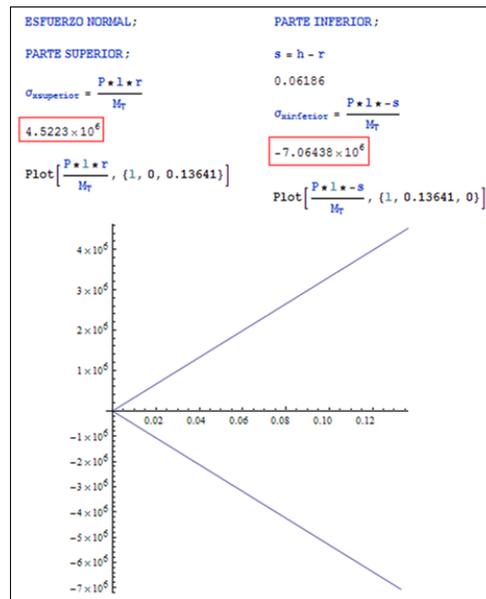
$$\varepsilon_x = \frac{6F(l-x)}{Eb \left(\frac{h-h_i}{s_2} \cdot x + h \right)^3} \quad (3.7b)$$

donde ε_x = la deformación de la cuchilla (m).

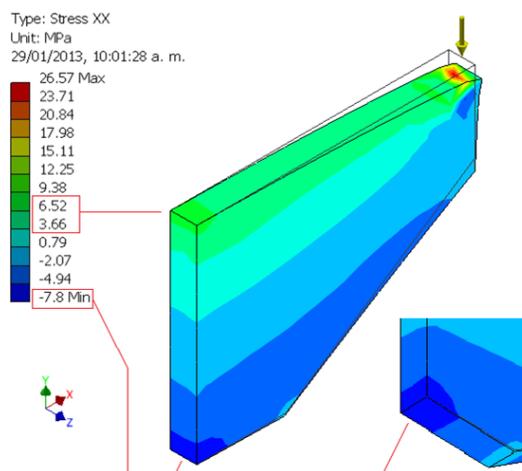
A partir de las ecuaciones desarrolladas, los esfuerzos normales de tensión y compresión, las deformaciones y la deflexión del eje neutro de los dos tipos de cuchillas utilizadas en el rodillo aireador se calcularon de forma numérica en Mathematica (www.wolfram.com, 2014), y fueron simulados por elemento finito en SolidWorks (www.solidworks.com, 2014). Se utilizó una carga puntual de 1000 N y un módulo de elasticidad de 200 GPa.

3.4 RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los esfuerzos normales de la cuchilla tipo 1 calculados numéricamente fueron 4.52 MPa en la zona superior del elemento y -7.06 MPa en la zona inferior del mismo (Figura 3.3a). Los esfuerzos normales calculados por elemento finito, se encontraron en el rango de 3.66 a 6.52 MPa para la parte superior del elemento y -7.8 MPa para la parte inferior del mismo (Figura 3.3b).



(a) Numéricamente en Mathematica.



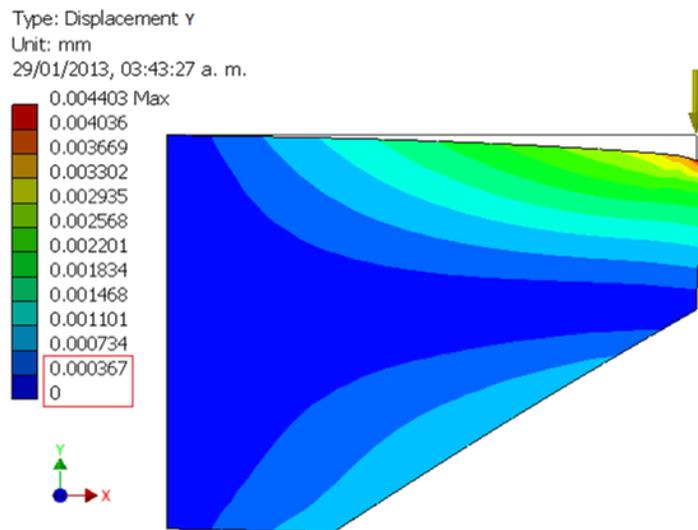
(b) Elemento finito en SolidWorks.

Figura 3.3. Esfuerzos normales de la cuchilla tipo 1.

El desplazamiento máximo del eje neutro de la cuchilla tipo 1 calculado numéricamente fue 0.29 mm (Figura 3.4a). El desplazamiento máximo calculado por elemento finito fue 0.367 mm (Figura 3.4b). Aun cuando la diferencia porcentual de los dos resultados es del 26%, la diferencia numérica es apenas de 75 μm (75/1000 mm), por lo que los dos resultados no presentan diferencia estadística significativa, y son confiables.

CUCHILLA TIPO 1:	DEFLEXION DEL EJE NEUTRO:
DATOS DE LA CUCHILLA TIPO 1:	$v = \frac{P \cdot l^3}{3 \cdot S \cdot M_T} \cdot 1000 // N$
P = 1000;	0.000252039
b = 0.0128;	
h = 0.10146;	FUNCIONES CON REFERENCIA DEL EJE NEUTRO:
s ₁ = 0.0437;	$M_{1T} = \frac{b (h^3 - 3h^2 r_2 + 3h r_2^2)}{3}$
l = 0.13641;	1.19449 $\times 10^{-6}$
r = 0.0396;	
r ₂ = 0.042861;	$M_{2T} = \frac{b \left(r_2^3 + \left(\frac{h-r_2}{1-r_2} \right) x + (h-r_2) \right)^3}{3}$
S = 200 000 000 000;	0.0000132949
x = 0.13641;	$M_{T2} = M_{1T} + M_{2T}$
MOMENTOS DE INERCIA:	0.0000144894
$M_1 = \frac{b (h^3 - 3h^2 r + 3h r^2)}{3}$	$v = \frac{P \cdot l^3}{3 \cdot S \cdot M_{T2}} \cdot 1000 // N$
1.27495 $\times 10^{-6}$	0.00029197
$M_2 = \frac{b \left(r^3 + \left(\frac{h-r}{1-r} \right) x + (h-r) \right)^3}{3}$	
0.00001551	
$M_T = M_1 + M_2$	
0.0000167849	

(a) Numéricamente en Mathematica.



(b) Elemento finito en SolidWorks.

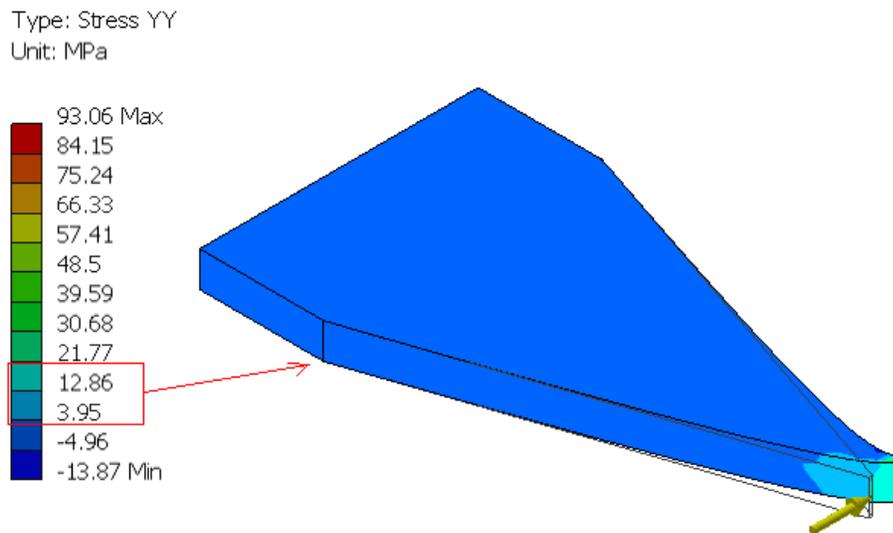
Figura 3.4. Deflexión del eje neutro de la cuchilla tipo 1.

Para la cuchilla tipo 2 se obtuvo un esfuerzo normal de 8.83 MPa y una deformación de 44.16 μm (44/1000 mm) de forma numérica (Figura 3.5a). Los esfuerzos normales calculados por elemento finito se encontraron en el rango de 3.95 a 12.86 Mpa (Figura 3.5b).

```

F = 1000;
b = 0.01275;
l = 0.195;
h = 0.101;
h1 = 0.001;
s1 = 0.045;
M = 200 000 000 000;
x = .001;
s2 = 1 - s1           0.15
σ =  $\frac{6 * F * (l - x)}{b * \left(\frac{h-h_1}{s_2} x + h\right)^2}$   8.83254 × 106
ε =  $\frac{\sigma}{M}$            0.0000441627
    
```

(a) Numéricamente en Mathematica.



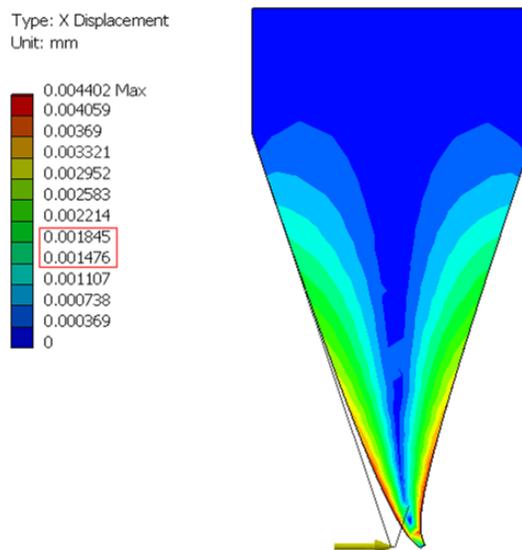
(b) Elemento finito en SolidWorks.

Figura 3.5. Esfuerzos y deformación de la cuchilla tipo 2.

La deflexión máxima del eje neutro de la cuchilla tipo 2 calculada numéricamente fue 1.43 mm (Figura 3.6a). El desplazamiento máximo calculado por elemento finito fue 1.48 mm (Figura 3.6b). La diferencia porcentual de los dos resultados fue 3% y la diferencia numérica fue 44 μm (44/1000 mm), por lo que los dos resultados no presentan diferencia estadística significativa, y son confiables.

$F = 1000;$	$v = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot M \cdot V_1} \cdot 1000$
$b = 0.01275;$	0.00127104
$l = 0.195;$	
$h = 0.101;$	
$h_i = 0.001;$	$V_2 = \frac{b}{12} \left(\frac{h - h_i}{s_2} x + h \right)^3$
$s_1 = 0.045;$	8.62814×10^{-6}
$M = 200\,000\,000\,000;$	
$s_2 = 1 - s_1$	$v = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot M \cdot V_2} \cdot 1000$
0.15	0.0014323
$V_1 = \frac{b}{12} \cdot \left(h^3 + \left(\frac{h - h_i}{s_2} x + h \right)^3 \right)$	
9.72283×10^{-6}	

(a) Numéricamente en Mathematica.



(b) Elemento finito en SolidWorks.

Figura 3.6. Deflexión del eje neutro de la cuchilla tipo 2.

La Tabla 3.1 presenta los resultados obtenidos de los esfuerzos y deformaciones de las cuchillas tipo 1 y tipo 2.

Tabla 3.1. Esfuerzos y deformaciones de las cuchillas.

Cuchilla	ET, σ_x (MPa)	EC, σ_x (MPa)	DT, ε_x (mm)	DC, ε_x (mm)	DEN, v_x (mm)
Tipo 1	4.52	7.06	2.26×10^{-7}	3.53×10^{-7}	2.52×10^{-4}
Tipo 2	5.5	5.5	1.86×10^{-7}	1.86×10^{-7}	1.43×10^{-3}

ET = Esfuerzos normales de tensión,

EC = Esfuerzos normales de compresión,

DT = deformaciones por tensión,

DC = deformaciones por compresión,

DEN = deflexión del eje neutro.

Los esfuerzos normales de tensión y de compresión en la cuchilla tipo 2 fueron iguales debido a la geometría simétrica, sin embargo al cambiar la geometría a la forma asimétrica de la cuchilla tipo 1, el esfuerzo normal de tensión incrementó en 28% y el esfuerzo normal de compresión disminuyó en 18% respecto al esfuerzo normal de la cuchilla simétrica.

Como los esfuerzos normales de tensión y de compresión en la cuchilla simétrica fueron iguales, las deformaciones de la cuchilla también fueron iguales en el lado de aplicación de la carga y en el otro. En las cuchillas asimétricas (tipo 1) aun cuando las deformaciones en los lados de la cuchilla sometidos a tensión y compresión fueron diferentes, la diferencia fue apenas de 167 nm (167/1000000 mm).

La deflexión del eje neutro del elemento fue mayor en la cuchilla simétrica en casi cinco veces al desplazamiento de la cuchilla asimétrica, con una diferencia numérica de

1.18 mm. Debido a la deflexión que presentó, la cuchilla tipo 1 es mejor que la cuchilla tipo 2 para la construcción del rodillo aireador, la cual al ser más rígida es más susceptible a la fatiga en condiciones cíclicas de operación y en suelos compactados.

3.5 CONCLUSIONES

Las cuchillas tipo 1 presentaron diferencias en los esfuerzos normales de tensión y compresión, por lo cual también mostraron diferentes deformaciones en el lado de aplicación de la carga y en el lado opuesto, lo cual incrementó el desplazamiento o deflexión del eje neutro.

Con base en los indicadores de esfuerzo-deformación que presentó la cuchilla tipo 1, se recomienda considerarla en la fabricación del rodillo aireador, ya que cumple con los requerimientos de resistencia y deflexión para hacer frente a las condiciones de no homogeneidad en las características del suelo.

La cuchilla tipo 2 presentó una mayor rigidez, lo cual la hace más susceptible a la fatiga o incluso a rupturas en condiciones cíclicas de operación y en suelos compactados.

3.6 LITERATURA CITADA

Artilugio Ramírez Alfonso, Guardado Lopez Rocio. 1993. El agua en el suelo. In:

Agronomía del Riego. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España; pp 26-29.

Håkansson I.; Voorhees W. B., Elonen P.; Raghavan G. S. V.; Lowery B.; Van Wijk A.

L. M.; Rasmussen K.; Riley H. 1987. Effect of high axle-load traffic on subsoil compaction and crop yield in humid regions with annual freezing. Soil and Tillage Research. 10(3):259-268.

Keller Thomas; Lamandé Mathieu. 2012. From soil stress to soil deformation: current state of the research. Pp. 19-21. En: NJF seminar 448: Soil compaction – effects on soil functions and strategies for prevention. Nordic Association of Agricultural Scientists NJF Report, Vol 8 No (1) 2012. Helsinki, Finland. 120 p.

Viniegra Heberlein Fermín. 2011. Mecánica de los cuerpos deformables. 1ra Edición. Edit. Las prensas de ciencia. México.

Delgado Pérez de Alba Tomás. 1957. Resistencia de Materiales, primera parte. 1ra Edición. Edit. ESPASA-CALPE. Madrid, España.

Timoshenko S.; Goodier J. N. 1951. Theory of Elasticity. 1ra Edición. Edit. McGraw-Hill, New York, E.U.A.

Sokolnikoff I. S. 1951. Tensor Analysis Theory and Applications. 1ra Edición. New York, E.U.A.

www.solidworks.com. 2014. SolidWorks Tutorial

www.wolfram.com. 2014. Mathematica Tutorial.

CAPÍTULO 4. EFECTO DEL RODILLO AIREADOR EN LA HUMEDAD Y AIREACIÓN DE UN SUELO FRANCO-ARCILLOSO

4.1 RESUMEN

La compactación del suelo debida al tráfico de los animales y maquinaria agrícola utilizados en las labores agrícolas, reduce los espacios porosos y la aireación, y aumenta la densidad del suelo. El incremento en la densidad del suelo reduce su capacidad de permeabilidad y de infiltración, por lo que el agua de lluvia no puede ser aprovechada por las raíces de las plantas. Al incrementar la densidad aparente del suelo reduce la difusión del oxígeno y el flujo de agua en el suelo, lo cual limita el desarrollo de las raíces de las plantas. Fueron evaluados los parámetros de aireación y humedad del suelo al trabajar con un rodillo aireador en un suelo franco-arcilloso en diferentes condiciones de humedad. Se calcularon los valores de la tasa de transferencia de difusión del aire en el suelo en diferentes condiciones, a partir de la primera Ley de Fick. El paso del rodillo aireador mejoró la distribución del agua y aire del suelo, incrementó la porosidad total hasta 4.24% en las áreas con menor humedad y hasta 3.77% en las áreas con mayor humedad. En promedio, la humedad del suelo incrementó en 110% en las áreas más secas y en 77% en las áreas menos secas, y el volumen del aire en el suelo disminuyó en 21.88% en las áreas menos húmedas y en 16.82% en las áreas más húmedas.

Palabras clave: Humedad, aireación, porosidad, difusión del oxígeno.

4.2 INTRODUCCIÓN

El crecimiento y desarrollo de los cultivos requieren de la disponibilidad de agua y oxígeno en niveles adecuados en el suelo, así como del suministro de nutrientes, luz y calor (Gliński *et al.*, 2004a). La disponibilidad de oxígeno en las raíces depende de la tasa de flujo de oxígeno en el suelo, así como del desalojo de dióxido de carbono hacia la atmósfera, lo cual se conoce como aireación (Stępniewski y Stępniewska, 2004; Lipiec, 2004).

La aireación del suelo está relacionada con la porosidad llena de aire (Gliński y Stępniewska, 2004; Gliński *et al.*, 2004b; Gliński *et al.*, 2004c), la cual se define como la medida del contenido relativo de aire del suelo (Brzezińska, 2004). El aire y el agua ocupan aproximadamente el 50% del espacio del suelo, y la materia orgánica y el material mineral ocupan el otro 50% (Gliński *et al.*, 2004b). Este volumen considerable del suelo ocupado por el aire y el agua, significa que el aire y el agua juegan una de las partes más importantes en las relaciones del suelo y las plantas (Brzezińska, 2004; Gliński *et al.*, 2004c).

El aire en el suelo es importante debido a la respiración vital de las raíces de las plantas, la cual depende del oxígeno en el suelo. Las raíces como los animales, no fotosintetizan, ambos emiten dióxido de carbono y capturan el oxígeno durante la respiración. La difusión de los gases en el suelo prácticamente se detiene cuando la fracción de aire que llena a los poros es menor del 10% (Wesseling y van Wijk, 1957), por lo cual, las raíces necesitan al menos 10% del volumen de espacio de aire en el suelo para sobrevivir (Kirkham, 1994).

El contenido de humedad apropiado para el crecimiento de las plantas, corresponde a espacios del suelo ocupado por agua y por aire en igual porcentaje, es decir, en un 25%

ocupado por agua y un 25% ocupado por aire, aproximadamente, del volumen total del suelo (Kirkham y Powers, 1972; Gliński *et al.*, 2004b).

La habilidad del suelo para soportar la vegetación, depende principalmente de su adecuación como medio para el crecimiento de las raíces (Nuñez, 1999). Por su parte la habilidad de la raíz para encontrar espacio para crecer o forzar su camino en el suelo, es el factor limitante más importante para el crecimiento de la planta (Russell, 1973). Estas limitantes pueden resultar en una deficiente aireación y en un estrés de humedad o nutrimentos (Nuñez, 1999). La tendencia hacia el uso de maquinaria pesada, equipos de labranza y el tráfico vehicular sobre las tierras agrícolas ha incrementado no solo la severidad, sino además la profundidad a la cual ocurre la compactación del suelo (Håkansson *et al.*, 1987).

Este trabajo presenta la utilización de un rodillo aireador equipado con cuchillas, acoplado en el enganche de tres puntos del tractor, con el objetivo de mejorar la aireación, la infiltración del agua de lluvia en el suelo y la difusión del oxígeno, a través de un laboreo vertical sin voltear el prisma del suelo, para no romper la estructura del suelo y disminuir la compactación superficial.

4.3 MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar del experimento

Las pruebas de campo y toma de muestras se realizaron en dos parcelas. Una parcela de 2000 m² (20x100 m) ubicada en Santa María Tecuanulco, a 19° 30' LN y 98° 23' LO, a 2550 msnm (Parcela 1), y otra parcela de 200 m² (10x20 m) ubicada en el Campo experimental “La Cerona” de la Universidad Autónoma Chapingo, a 19° 49' LN

y 98° 51' LO, a 2250 msnm (Parcela 2), ambos lugares en el Estado de México (Figura 4.1).

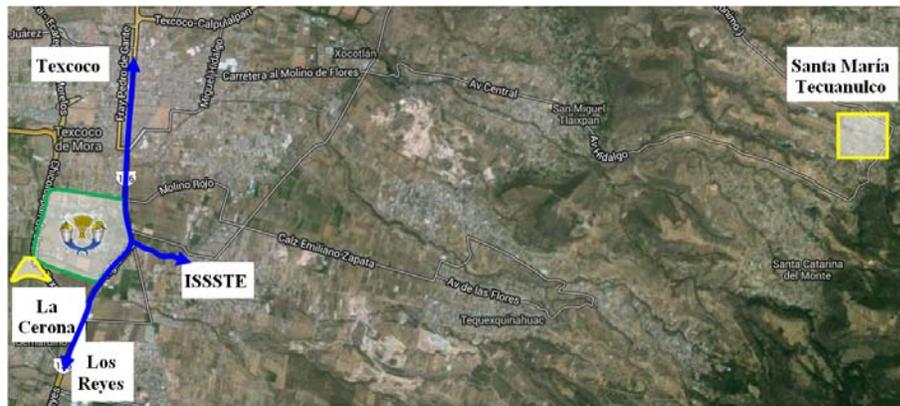


Figura 4.1. Ubicación del experimento de campo y toma de muestras (<https://maps.google.com.mx>, 2014).

Metodología

En la parcela 1 se realizaron pruebas en condiciones de suelo seco y suelo húmedo, con el rodillo aireador portando las cuchillas de forma triangular asimétrica, con el corte en el borde diagonal (Figura 4.2). Se utilizó una velocidad de trabajo de 5 km h⁻¹ y un contrapeso de 200, 400 y 500 kg sobre el chasis del implemento.

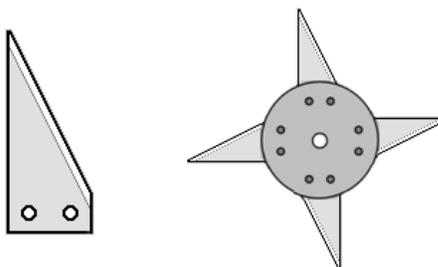


Figura 4.2. Cuchillas de forma triangular asimétrica con el corte en el borde diagonal.

Se realizó una corrida con el rodillo aireador y se tomaron muestras de suelo para determinar la humedad gravimétrica, densidad aparente y densidad real, y calcular la

porosidad total del suelo, los volúmenes de suelo ocupados por agua y por aire, y el coeficiente de difusión del oxígeno en el suelo, en el área trabajada y en el área testigo. Posteriormente, tres días después de una lluvia se evaluaron los mismos parámetros.

De acuerdo a las muestras de suelo recolectadas de manera aleatoria en la parcela 2, el suelo presentó contenidos de 39% de arena, 26% de limo y 35% de arcilla, el cual fue clasificado de acuerdo al triángulo de texturas (Figura 4.3) como un suelo franco arcilloso (Ortiz y Ortiz, 1990).

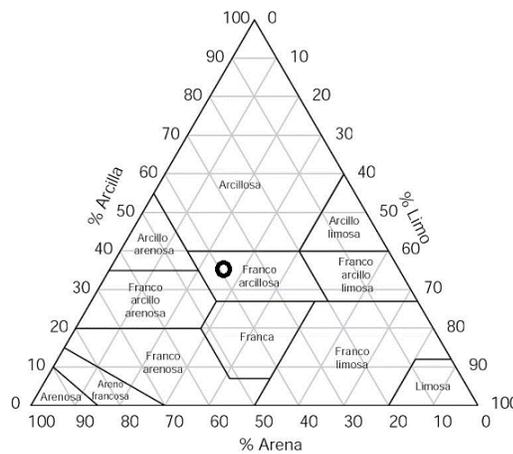


Figura 4.3. Triángulo de texturas del suelo (Ortiz y Ortiz, 1990).

La porosidad llena de aire se calcula con la Ecuación 4.1 (Epstein (1997):

$$P_T = \left(1 - \frac{D_{ap}}{D_r}\right) \cdot 100 \quad (4.1)$$

donde P_T = es la porosidad total del suelo (%), D_{ap} = la densidad aparente o densidad de masa (gr cm^{-3}), D_r = la densidad de partículas o densidad real (gr cm^{-3}), la cual en suelos minerales varía de 2.60 a 2.75 gr cm^{-3} . La densidad aparente se calcula como el cociente masa/volumen del suelo (Ortiz y Ortiz, 1990).

La densidad aparente del suelo fue determinada con el método de la probeta, la densidad real fue obtenida con el método del picnómetro, y la humedad del suelo fue calculada por gravimetría, de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana de análisis de suelos NOM-021-RECNAT-2000 (Secretaría de Economía, 2000).

El contenido de humedad del suelo fue determinado con la Ecuación 4.2 (Ortiz y Ortiz, 1990):

$$\theta_g = \left(\frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} \right) \cdot 100 \quad (4.2)$$

donde θ_g = es la humedad gravimétrica del suelo (%), P_{ss} = el peso del suelo seco (g), P_{sh} = el peso del suelo húmedo (g).

La humedad volumétrica fue determinada con la Ecuación 4.3 (Ortiz y Ortiz, 1990):

$$\theta_v = \left(\frac{D_{ap}}{D_w} \right) \cdot \theta_g \quad (4.3)$$

donde θ_v = es la humedad volumétrica del suelo (%), D_w = la densidad del agua (g cm^{-3}).

La fracción de volumen de aire en el suelo, fue calculada con la Ecuación 4.4 (Ortiz y Ortiz, 1990):

$$f_a = P_T - \theta_v \quad (4.4)$$

donde f_a = es la fracción de volumen de aire en el suelo (%).

De los diferentes mecanismos de transporte de gases, la difusión es el de mayor importancia para la aireación del suelo. De acuerdo con la ley de Fick, el movimiento de gases a través del suelo por difusión en estado estacionario es directamente proporcional al gradiente de concentración, al área de la sección disponible y al tiempo.

La ecuación de la primera Ley de Fick para una difusión unidimensional (Gliński *et al.*, 2004a; Scott, 2000), es de la siguiente forma (Ecuación 4.5):

$$J_d = -D_s \cdot \left(\frac{\Delta_c}{dx} \right) \quad (4.5)$$

donde J_d = es la tasa de transferencia de difusión ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), D_s = el coeficiente de difusión efectivo en el suelo ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), Δ_c = la diferencia de la concentración a través de la columna (kg m^{-3}).

La tasa de transferencia de difusión para una distribución lineal (Gliński *et al.*, 2004a; Scott, 2000), se calcula con la Ecuación 4.6:

$$J_d = -D_s \cdot \left(\frac{\Delta_c}{L} \right) \quad (4.6)$$

donde L = es la longitud de la columna (m).

Cuando la difusión unidimensional ocurre en estado estacionario de la superficie a través de la columna de suelo, el coeficiente de difusión molecular del oxígeno de una masa de aire es $D_o = 1.89 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Gliński *et al.*, 2004a; Scott, 2000).

De acuerdo a Scott (2000), la concentración de oxígeno en el suelo es 0.275 kg m^{-3} . El coeficiente de difusión efectivo en el suelo se obtiene con la ecuación de Penman (Scott, 2000), la cual relaciona el coeficiente de difusión del oxígeno y la porosidad del suelo (Ecuación 4.7).

$$D_s = \frac{2}{3} \cdot f_a \cdot D_o \quad (4.7)$$

donde D_o = es el coeficiente de difusión molecular del oxígeno ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) citado en la Tabla 4.1, f_a = la porosidad del suelo (%), 0.66 es el coeficiente de tortuosidad (adim).

La tasa de transferencia de difusión para una distribución de concentración lineal (Scott, 2000) se calcula con la Ecuación 4.8:

$$J_d = D_s \cdot \left(\frac{\Delta_c}{L} \right) = D_s \cdot \left(\frac{\Delta_{c.ini} - \Delta}{L} \right) \quad (4.8)$$

donde $\Delta_{c.ini}$ = es la concentración inicial (kg m^{-3}), Δ = el incremento en la concentración (kg m^{-3}).

La Tabla 4.1 presenta los coeficientes de difusión molecular del Oxígeno y Dióxido de carbono en función de la temperatura.

Tabla 4.1. Coeficientes de difusión molecular del Oxígeno (O₂) y Dióxido de carbono (CO₂) en función de la temperatura (Scott, 2000).

Temperatura		Coeficiente de difusión ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)			
		Aire ($D_o \times 10^{-5}$)		Agua ($D_o \times 10^{-9}$)	
K	°C	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂
273	0	1.78	1.38	0.99	1.15
278	5	1.84	1.43	1.27	1.30
280	7	1.86			
283	10	1.89	1.48	1.54	1.46
288	15	1.95	1.53	1.82	1.63
293	20	2.01	1.59	2.10	1.77
298	25	2.07	1.64	2.38	1.92
303	30	2.14	1.70	2.67	2.08

La parcela se dividió en dos áreas: una superficie sin rodillo aireador y otra área con rodillo aireador. La toma de muestras de suelo se realizó en dos períodos, un primer período con menor humedad, y un segundo período después de tres días con lluvia para incrementar la humedad. En cada muestreo se tomaron 20 muestras del suelo, de las cuales se utilizó el valor promedio. Se consideró una densidad real de 2.65 g cm^{-3} .

4.4 RESULTADOS Y DISCUSIONES

Se utilizó un coeficiente de difusión molecular del Oxígeno de 0.0000186 correspondiente a la temperatura del suelo de 7 °C (Tabla 4.1). La humedad gravimétrica inicial fue de 7.3%, la cual incrementó hasta 11.8% por las lluvias y hasta 18.3% por el uso del rodillo aireador. El uso del rodillo aireador incrementó la humedad gravimétrica hasta 55% (Figura 4.4).

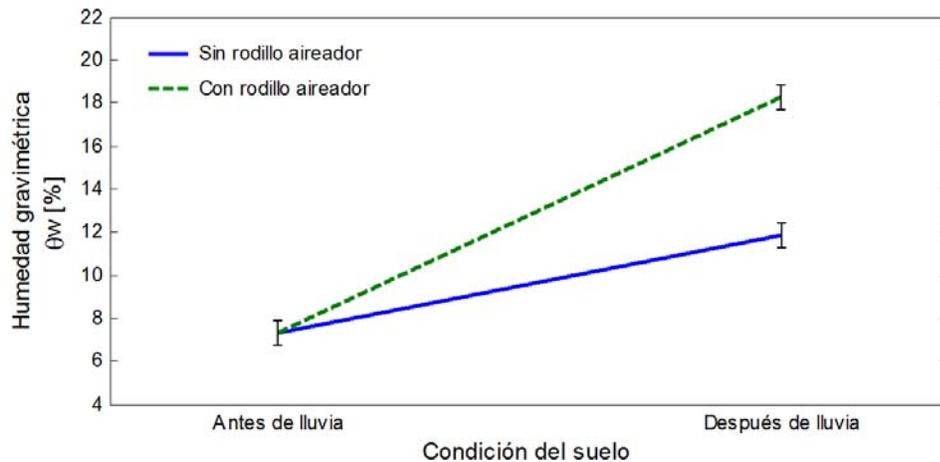


Figura 4.4. Humedad gravimétrica del suelo.

La humedad volumétrica inicial fue de 10.7%, la cual incrementó hasta 17.3% por las lluvias y hasta 24.8% por el uso del rodillo aireador. El uso del rodillo aireador incrementó la humedad volumétrica hasta 43% (Figura 4.5).

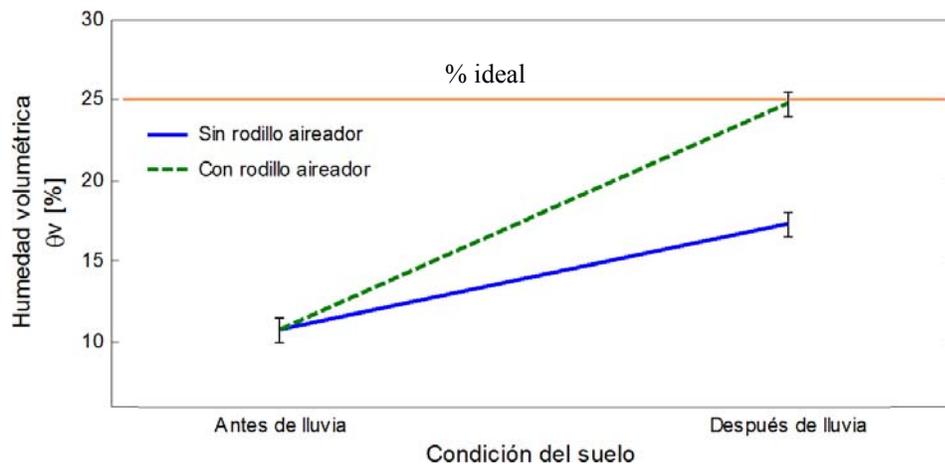


Figura 4.5. Humedad volumétrica del suelo.

La fracción de aire inicial fue de 33.8%, la cual disminuyó hasta 27.3% por las lluvias y hasta 23.9% por el uso del rodillo aireador. El uso del rodillo aireador disminuyó la fracción de aire hasta 12% (Figura 4.6).

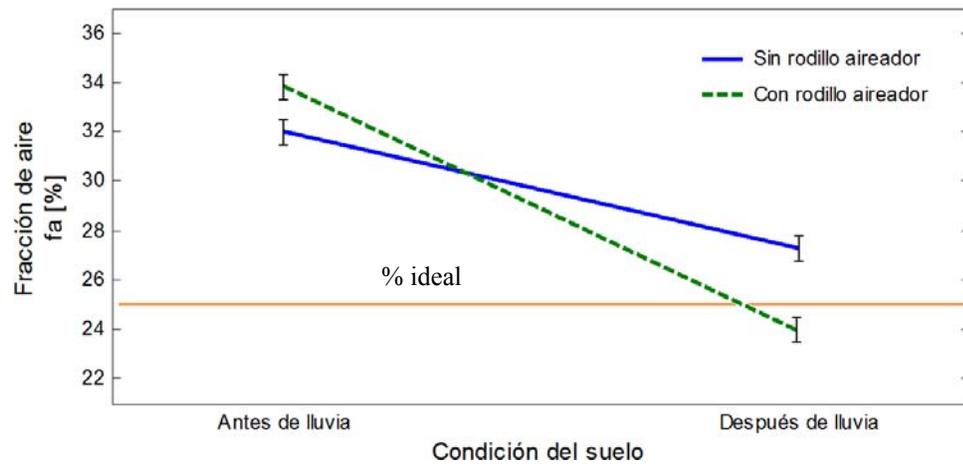


Figura 4.6. Fracción de aire del suelo.

Con el uso del rodillo aireador, la densidad aparente del suelo disminuyó de 1.47 a 1.36 g cm⁻³, es decir, en un 7.45%, lo cual es un indicador importante de que la compactación del suelo se redujo (Figura 4.7).

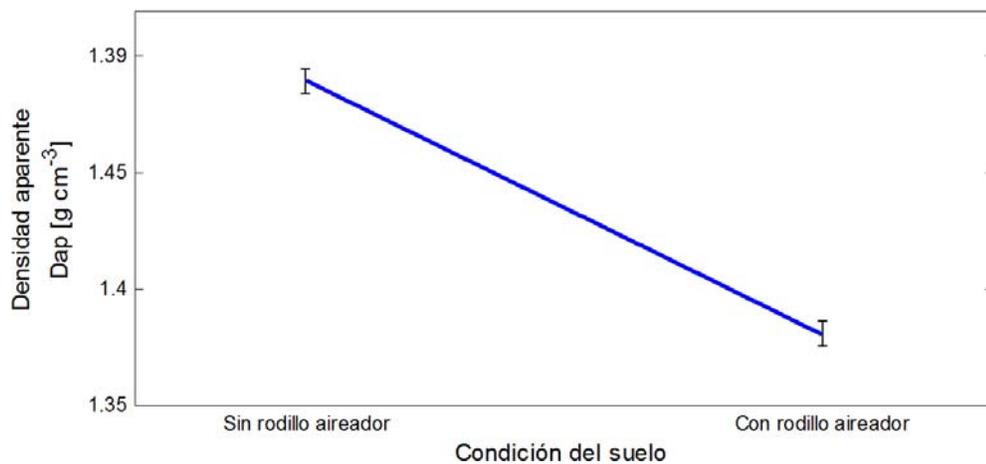


Figura 4.7. Densidad aparente del suelo.

El rodillo aireador en el suelo incrementó la porosidad total del suelo de 44.6 a 48.7%, es decir, en un 9.3% (Figura 4.8), lo cual explica la importancia del uso del rodillo aireador en suelos firmes y compactados para mejorar la aireación del suelo.

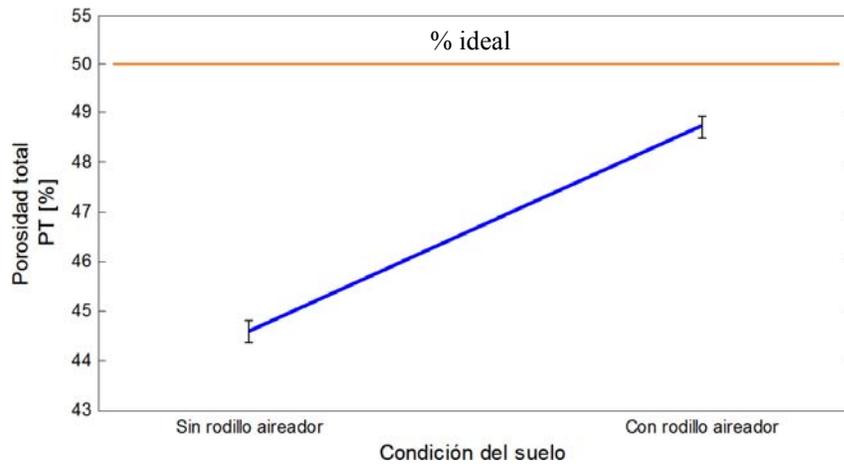


Figura 4.8. Porosidad total del suelo.

El uso del rodillo aireador en el suelo seco incrementó la tasa de difusión de Oxígeno, mientras que el rodillo aireador en el suelo húmedo disminuyó la tasa de difusión de Oxígeno. Lo anterior explica el efecto negativo de la remoción del suelo cuando el contenido de humedad es muy alto (Figura 4.9).

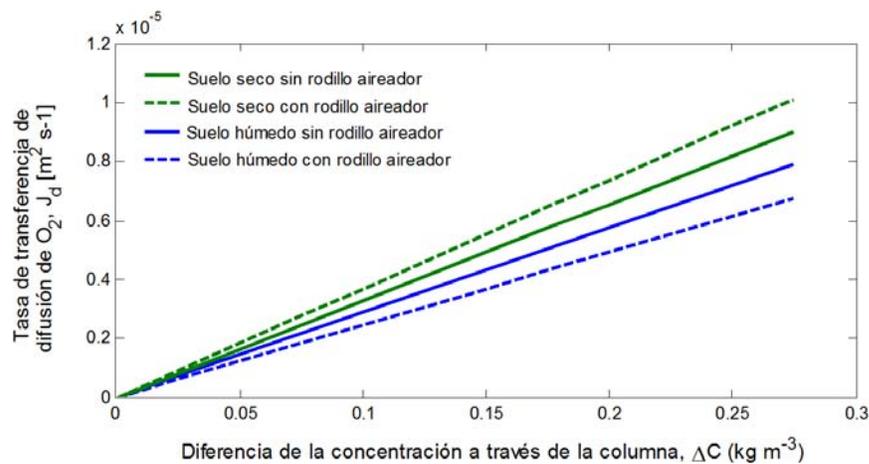


Figura 4.9. Tasa de transferencia de difusión de Oxígeno en el suelo.

4.5 CONCLUSIONES

Es viable utilizar el paso del rodillo aireador para incrementar la humedad del suelo tanto en las áreas secas como irrigadas, también se mejora la absorción de oxígeno e incrementa la porosidad total del suelo.

El paso del rodillo aireador incrementó la porosidad total del suelo hasta 4.24% en las áreas con menor humedad y hasta 3.77% en las áreas con mayor humedad. En valores promedio, la humedad del suelo incrementó en 110% en las áreas con menor humedad y en 67% en las áreas con mayor humedad, mientras que el volumen del aire disminuyó en 21.88% en las áreas con menor humedad y en 16.82% en las áreas con mayor humedad.

4.6 LITERATURA CITADA

- Brzezińska M. 2004. Aeration status of soil and enzyme activity. In: Soil – plant – atmosphere aeration and environmental problems. Pp. 55-59.
- Epstein E. 1997. The science of composting. Technomic Publishing Company Inc., Lancaster, PA, USA.
- Gliński Jan, Józefaciuk Grzegorz, Stahr Karl. 2004a. Soil – plant – atmosphere aeration and environmental problems. 146 p. Lublin – Stuttgart.
- Gliński J., Stępniewska Z., Ostrowski J., Stępniewski W. 2004b. Mapping of soil aeration properties. In: Soil – plant – atmosphere aeration and environmental problems. Pp. 60-64.
- Gliński J., Brzezińska M., Włodarczyk T. 2004c. Microbial ecology of soil porous médium. In: Soil – plant – atmosphere aeration and environmental problems. Pp. 65-71.

- Gliński P., Stępniewska Z. 2004. Redox relations in a loess soil on eroded hill slope. In: Soil – plant – atmosphere aeration and environmental problems. Pp. 43-47.
- Håkansson I.; Voorhees W. B., Elonen P.; Raghavan G.S.V.; Lowery B.; Van Wijk A.L.M.; Rasmussen K.; Riley H. 1987. Effect of high axle-load traffic on subsoil compaction and crop yield in humid regions with annual freezing. Soil and Tillage Research. 10(3):259–268.
- <https://maps.google.com.mx>. 2014. Google Maps
- Kirkham D.; Powers W. L. 1972. Advanced Soil Physics. Wiley: New York.
- Kirkham, M. B. 1994. Streamlines for diffusive flow in vertical and surface tillage: A model study. Soil Sci Soc Amer I 58:85-93.
- Lipiec J. 2004. Compaction effects on soil physical properties and root and shoot growth. In: Soil – plant – atmosphere aeration and environmental problems. Pp. 124-133.
- Norma Oficial Mexicana de análisis de suelos NOM-021-RECNAT-2000
- Núñez M. C. U. 1999. Efecto de la compactación del suelo sobre algunos parámetros morfológicos del desarrollo radical del maíz. Agronomía Tropical 49(1):93-106.
- Ortiz Villanueva Bonifacio, Ortiz Solorio Carlos Alberto. 1990. Edafología. Universidad Autónoma Chapingo. 394 p.
- Russell E. W. 1973. Soil conditions and plant growth. Longman Group Limited, London. 849 p.
- Scott Don. 2000. Soil Physics. 151 p.
- Secretaría de Economía. 2000. NOM-021-RECNAT-2000 - Norma Oficial Mexicana de análisis de suelos.

Stepniewski W., Stepniewska Z. 2004. Oxygenology: A new scientific discipline. In:
Soil – plant – atmosphere aeration and environmental problems. Pp. 43-47.

Wesseling J.; van Wijk W. R. 1957. Soil physical conditions in relation to drain depth.
En: Drainage of Agricultural Lands. American Society of Agronomy, pp. 461-504.

CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE TRABAJO DEL RODILLO AIREADOR EN EL SUELO

5.1 RESUMEN

Se midió la profundidad de penetración de los elementos de corte del rodillo aireador para 3, 5 y 7 km h⁻¹, en cuchillas de forma triangular asimétrica con corte en el borde diagonal, y con contrapesos adicionales sobre el implemento de 200, 400 y 500 kg. La profundidad de penetración de las cuchillas en el suelo se comportó de forma inversa a la velocidad de trabajo. La mejor combinación de velocidad y carga adicional que permitió una penetración apropiada de las cuchillas del rodillo aireador en el suelo, para mejorar la aireación e infiltración del agua de lluvia, fue la velocidad de avance de 3 km h⁻¹ con una carga adicional de 200 kg.

Palabras clave: Profundidad de penetración, cuchilla, velocidad, peso adicional.

5.2 INTRODUCCIÓN

La estructura del suelo es la forma en que están ordenados las partículas sólidas y los espacios ocupados por aire y agua. Los espacios de aire en el suelo son de gran importancia, ya que realizan diversas funciones, las cuales consisten en la distribución del aire, agua y nutrientes a través del suelo, y el anclaje de las raíces de las plantas para sostener un cultivo sano.

La estructura ideal del suelo presenta una buena distribución y mezcla de microporos y macroporos, los macroporos regulan la entrada del agua y el drenaje, y los microporos almacenan el agua que ingresa al suelo, ya sea por las lluvias o por el riego. La mayoría de los suelos están compuestos de aproximadamente un 50% de sólidos, constituido por arena, limo, arcilla y materia orgánica y aproximadamente un 50% de espacio poroso (McKenzie, 2010).

Los arados de vertederas, rastrillos y cinceles de pata de pato que ejercen fuertes presiones horizontales sobre el suelo, pueden causar el alisado de la superficie del suelo. Esto cierra los poros, rompe la continuidad de los poros dentro del suelo y reduce la tasa de infiltración. La reducción del tamaño de los poros reduce considerablemente la velocidad de infiltración de la lluvia. Si un poro se reduce diez veces de tamaño, la cantidad de agua que puede fluir a través del mismo en un tiempo dado será 10,000 veces menor que antes de ser reducido.

En la agricultura mecanizada, los pisos de arado se forman generalmente a 12 - 30 cm de profundidad, dependiendo del implemento usado y de su profundidad normal de trabajo. El tamaño de los poros para permitir el crecimiento y desarrollo normal de las raíces depende del tipo de cultivo, por ejemplo las raíces de los cereales pueden penetrar en los poros con diámetro de 0.1 a 1 mm, y las raíces de las dicotiledóneas requieren diámetros de 0.3 hasta 10 mm.

El grado de reducción de la porosidad del suelo causada por la labranza es suficiente para limitar la penetración de las raíces, y aunque no es contundente si puede disminuir en forma significativa la permeabilidad al agua en el suelo. La reducción del espacio de poros afecta el movimiento del agua y la tenacidad de los suelos para la retención de

agua, la expansión de las raíces y el intercambio gaseoso de Oxígeno y Dióxido de Carbono con la atmósfera.

El colapso o disminución de los espacios de poros, restringe el crecimiento y desarrollo de las raíces. Una vez que los poros han sido compactados hasta 0.2 - 0.3 mm de diámetro, es difícil que las raíces de los cultivos puedan penetrar libremente en el suelo.

La compactación del suelo es la reducción del espacio poroso entre los agregados del suelo (McKenzie, 2010), es el incremento de la densidad aparente del suelo comparado de su estado no compactado (Bouma, 2012). La compactación del suelo es uno de los mayores problemas en la agricultura y representa una de las mayores amenazas a la calidad del suelo sustentable (Keller y Lamandé, 2012). El tráfico de los animales y la maquinaria utilizados en las actividades agrícolas representan la causa principal de la compactación del suelo (Lipiec, 2012). Un componente importante del daño progresivo en el subsuelo es el incremento del peso de la maquinaria agrícola en los últimos años (Håkansson, 2005; Schjønning *et al.*, 2009).

El proceso de compactación del suelo puede ser dividido en las siguientes fases (Keller y Lamandé, 2012): 1) el esfuerzo es ejercido en la superficie del suelo por las ruedas de la maquinaria agrícola, 2) el esfuerzo es propagado en el suelo, 3) el suelo se deforma como una reacción al esfuerzo, donde la deformación es dependiente de la resistencia mecánica del suelo, y 4) la deformación del suelo conduce a la modificación de la estructura del suelo y el sistema de poros (Figura 5.1).

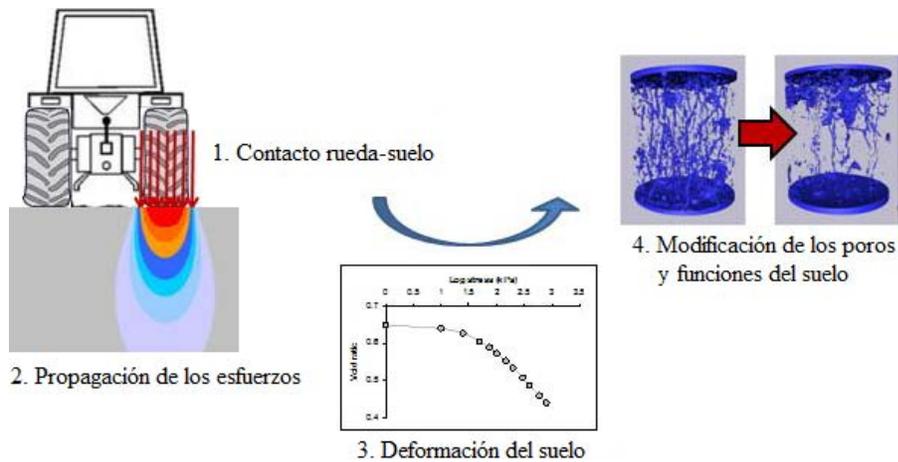
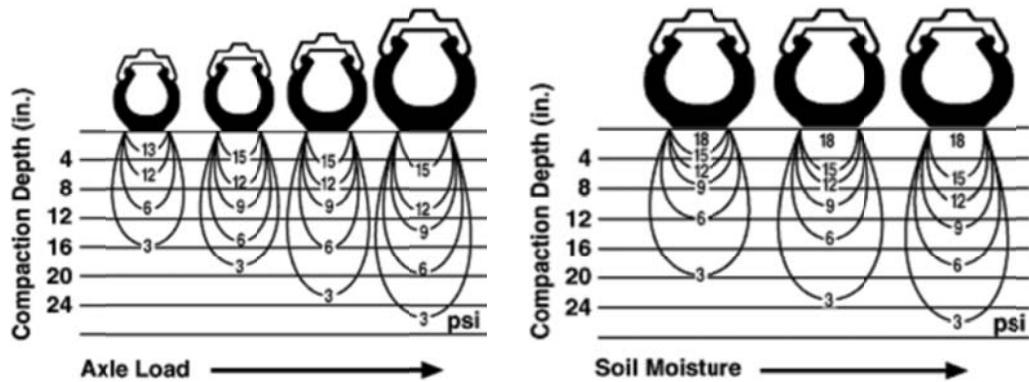


Figura 5.1. Fases del proceso de la compactación del suelo (Keller y Lamandé, 2012).

El tráfico de los animales y maquinaria agrícola utilizados para las labores de labranza, reduce los espacios vacíos y aumenta la densidad del suelo. El pisoteo de caballos y bueyes utilizados en las labores agrícolas produce presiones sobre el suelo de hasta 150 y 250 kPa, respectivamente (Soane y Van Ouwerkerk, 1994). Estas presiones son al menos iguales o mayores que las causadas por un tractor de ruedas.

El incremento en la densidad del suelo reduce su capacidad de permeabilidad y de infiltración, por lo que el agua de lluvia se desplaza sobre el suelo compactado por escurrimiento superficial y no puede ser aprovechada por las raíces de las plantas.

La probabilidad de que la compactación del suelo ocurra es una función del tipo de suelo, del contenido de humedad y del tráfico de los animales y maquinaria agrícola utilizados en las actividades de preparación del suelo y labores culturales de los cultivos (Figura 5.2). La compactación del suelo es más común en suelos húmedos y transitados por maquinaria pesada (McKenzie, 2010).



- (a) Cambio en la carga vertical por eje (Presión de contacto de 12 psi en todas las ruedas). (b) Cambio en la humedad del suelo (presión de contacto 12 psi, rueda 11-28, carga 1650 lb).

Figure 5.2. Efecto del peso de la maquinaria agrícola y de la humedad del suelo en la compactación del suelo (McKenzie, 2010).

La maquinaria agrícola pesada incluyendo los tractores, remolques para la cosecha de granos, combinadas, aspersoras de estiércol y las ruedas de sistemas de riego por pivote, ejercen peso considerable sobre la superficie del suelo, y por consecuencia en el subsuelo. El efecto del peso de las máquinas agrícolas puede penetrar hasta los 60 cm de profundidad cuando los suelos están húmedos. En los últimos años ha incrementado el tamaño y el peso de las máquinas agrícolas, lo cual resulta en un incremento considerable de la compactación del suelo debida al tráfico de las ruedas. El tractor 4x4, los remolques totalmente cargados con granos y las combinadas, han incrementado su peso hasta los 15 y 20 ton (McKenzie, 2010).

El contenido de humedad del suelo en el límite plástico inferior ha sido usado como un indicador del contenido crítico de humedad, arriba del cual la compactación ocurre (Bouma, 2012). Con la misma carga ejercida por una equipo agrícola, el incremento en la humedad del suelo aumenta la compactación (McKenzie, 2010).

La compactación del suelo además de reducir el volumen de los poros también modifica su geometría, lo cual afecta las funciones y parámetros del suelo tales como las propiedades hidráulicas, el transporte de gases y el crecimiento de las raíces. La compactación del suelo es asociada con muchos problemas ambientales y agronómicos, tales como la erosión, lixiviación de agroquímicos a los mantos freáticos, emisiones de gases de invernadero y pérdidas en los rendimientos de los cultivos (Keller y Lamandé, 2012).

La remoción del suelo en las labores de labranza primaria y secundaria, aunado al peso de las máquinas agrícolas, producen los siguientes efectos negativos en el suelo relacionados con la compactación (FAO, 2004):

- la pérdida de la humedad del suelo por la rotura del prisma del suelo,
- disminución del contenido de materia orgánica,
- pérdida de los canales continuos producidos por las raíces y de los macroporos,
- reducción de la infiltración del agua de lluvia,
- la erosión se multiplica diez veces,
- mayor susceptibilidad y prolongación de la temporada de sequía,
- esterilización de la vida del suelo, principalmente la mesofauna y los microorganismos,
- costos adicionales de preparación del suelo y de la construcción de las curvas de nivel,
- retrasos en la siembra,
- incremento de la inversión en maquinarias.

En este trabajo se presentan los parámetros de trabajo de un rodillo aireador, cuya función principal es incrementar la aireación del suelo y la infiltración del agua de lluvia en el suelo después de la cosecha del ciclo agrícola anterior. La utilización del rodillo aireador es una alternativa de la labranza convencional para acondicionar las propiedades físicas del suelo sin degradar la estructura del suelo, el tamaño y distribución del espacio poroso.

5.3 MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar del experimento

Las pruebas de campo y toma de muestras se realizaron en una parcelas de 2000 m² (20x100 m) ubicada en Santa María Tecuanulco, a 19° 30' LN y 98° 23' LO, a 2550 msnm, en el Estado de México (Figura 5.3).

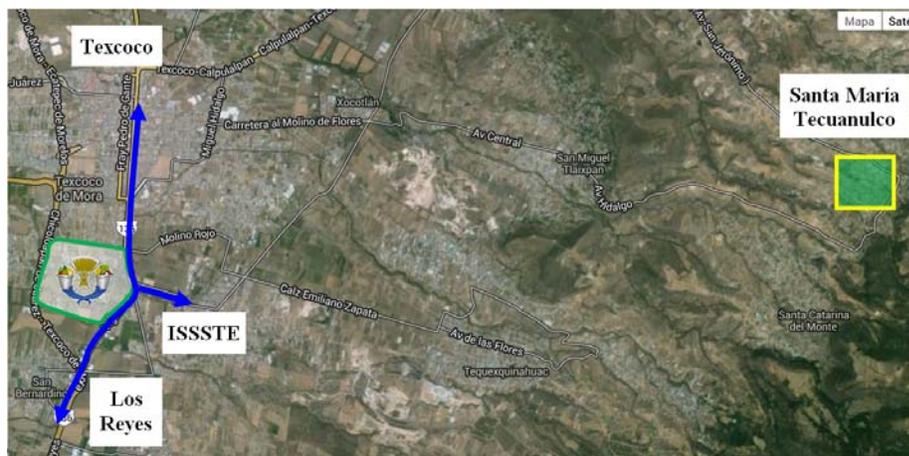


Figura 5.3. Ubicación del experimento de campo y toma de muestras (<https://maps.google.com.mx>, 2014).

Metodología

Se construyeron cuchillas metálicas de geometría triangular asimétrica con el corte en el borde diagonal las cuales son montadas en discos porta-cuchillas (Figura 5.4).

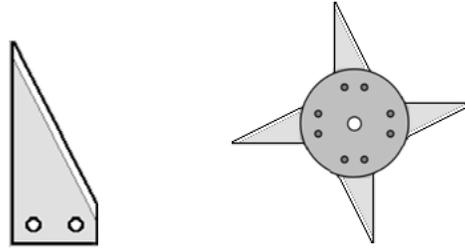


Figura 5.4. Cuchillas de forma triangular asimétrica con el corte en el borde diagonal.

Los discos porta-cuchillas fueron instalados de forma equidistante en el eje del rodillo aireador (Figura 5.5a). La fabricación del rodillo aireador consistió en un eje solido de acero A36 fijado en sus extremos por chumaceras en una estructura construida en material AISI 1018, para ser acoplada al enganche de tres puntos del tractor MF-592T (Figura 5.5b).



(a) Discos porta-cuchillas.



(b) Estructura para acoplar el rodillo aireador al enganche de tres puntos del tractor.

Figura 5.5. Construcción del rodillo aireador.

Se utilizaron contrapesos adicionales sobre el implemento de 200, 400 y 500 kg para mejorar la penetración de las cuchillas en el suelo (Figura 5.6).



Figura 5.6. Adición de contrapesos sobre el rodillo aireador.

El experimento se realizó en dos fases de acuerdo a la época de lluvias para diferenciar la humedad del suelo. La primera fase del experimento se llevó a cabo antes de que cayeran las primeras lluvias para obtener las muestras de suelo con la menor humedad. La segunda fase del experimento se realizó a una semana después de haber empezado las lluvias, para obtener un incremento en la humedad del suelo.

5.4 RESULTADOS Y DISCUSIONES

La Figura 5.7 muestra las grietas en el suelo hechas por las cuchillas del rodillo aireador. Las dimensiones de las punzadas son suficientes para incrementar la capacidad de infiltración del agua de lluvia.



Figura 5.7. Penetración de las cuchillas del rodillo aireador en el suelo.

La penetración de las cuchillas en el suelo presentó un comportamiento inverso a la velocidad de trabajo. En el suelo con mayor humedad al utilizar un peso adicional de 200 kg y una velocidad de trabajo de 3 km h^{-1} las cuchillas profundizaron a 15 cm, y al incrementar la velocidad a 7 km h^{-1} la penetración se redujo a los 12 cm (Figura 5.8).

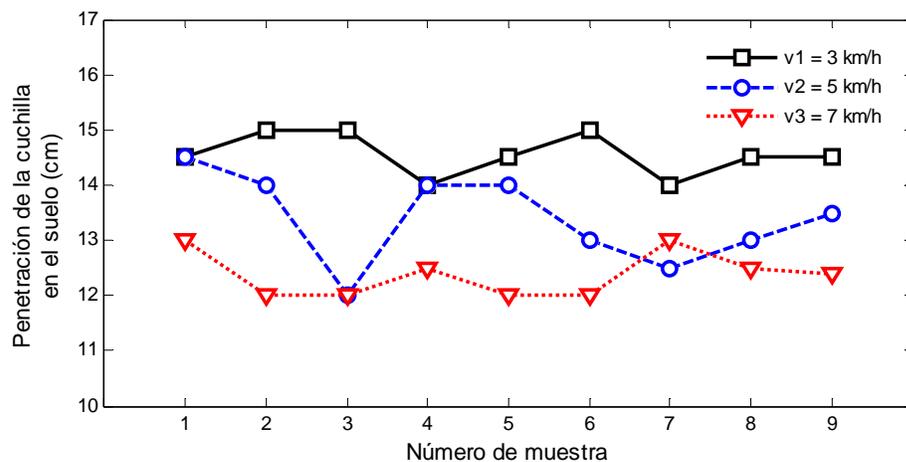


Figura 5.8. Penetración de las cuchillas en el suelo con mayor humedad.

En el suelo con mayor humedad, en promedio, la profundidad de penetración de las cuchillas en función de la velocidad de trabajo, se puede calcular con la ecuación lineal: $h = 0.75v - 17.25$ al agregar una carga adicional de 200 kg sobre el implemento, donde por cada incremento de la velocidad de trabajo en 1 km h^{-1} , la profundidad de penetración disminuye en 0.75 cm (Figura 5.9).

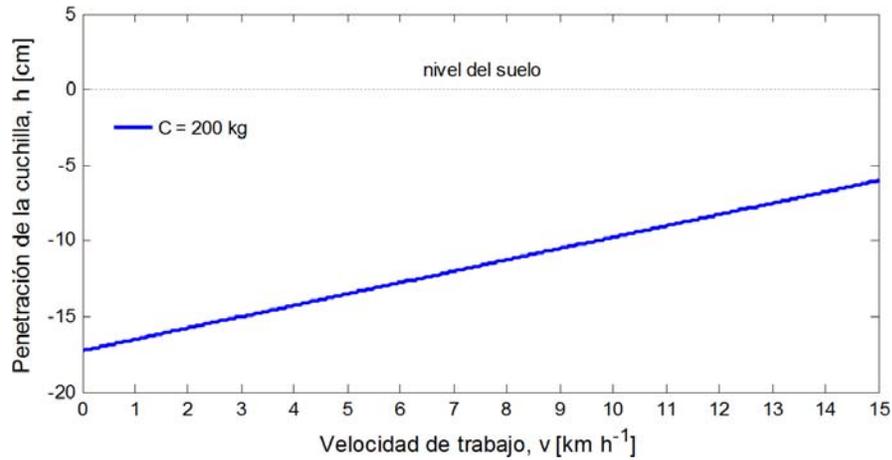


Figura 5.9. Penetración de las cuchillas en el suelo con mayor humedad, en función de la velocidad de trabajo.

En el suelo con menor humedad, a una velocidad de trabajo de 3 km h^{-1} , las cuchillas profundizaron hasta los 8.5 cm, y al incrementar la velocidad a los 7 km h^{-1} la penetración se redujo hasta los 6 cm (Figura 5.10). Al agregar un peso adicional de 200 kg, la penetración de las cuchillas en el suelo incrementó entre 3.5 y 2.5 cm, al aumentar la velocidad de trabajo en el rango mencionado.

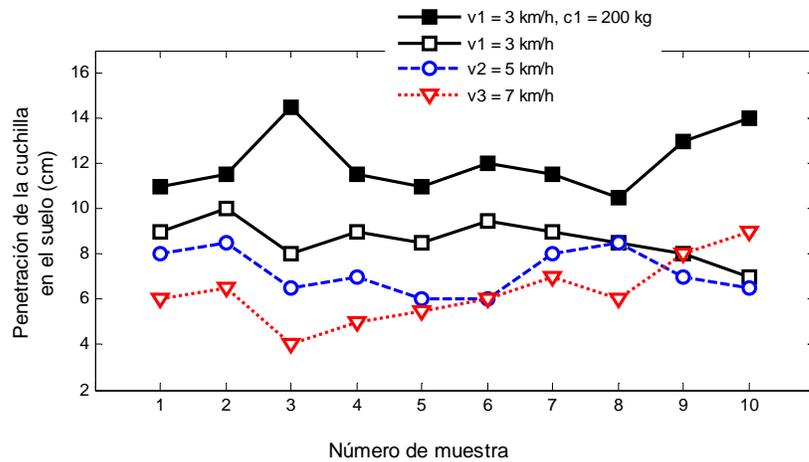


Figura 5.10. Penetración de las cuchillas en el suelo con menor humedad.

En el suelo con menor humedad, en promedio, la profundidad de penetración de las cuchillas en función de la velocidad de trabajo, se puede calcular con la ecuación $h = 0.625v - 10.375$ sin carga adicional, y con la ecuación $h = 0.875v - 14.625$ al agregar una carga adicional de 200 kg sobre el implemento, donde por cada incremento de la velocidad de trabajo en 1 km h^{-1} , la profundidad de penetración disminuye en 0.625 cm y en 0.875 cm, respectivamente (Figura 5.11).

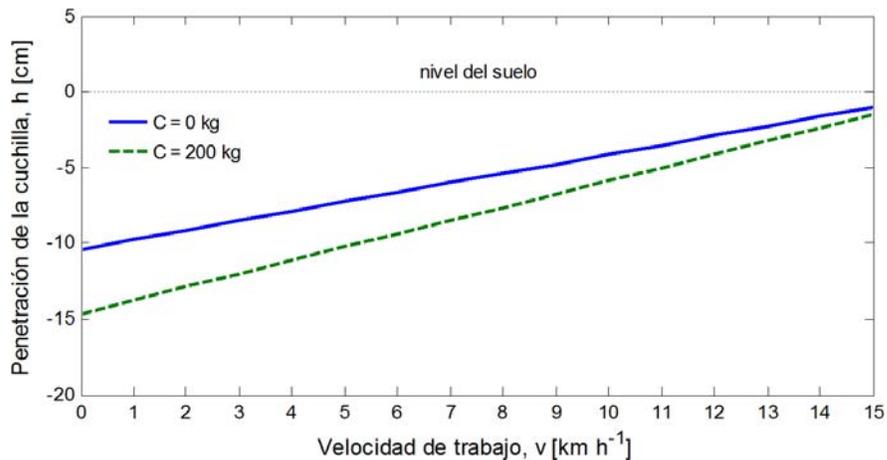


Figura 5.11. Penetración de las cuchillas en el suelo con menor humedad, en función de la velocidad de trabajo.

Al incrementar el peso adicional en el implemento en 200 kg, la penetración de las cuchillas en el suelo incrementó hasta 68% a una velocidad de trabajo de 3 km h⁻¹ y hasta 50% a los 5 km h⁻¹ (Figura 5.12).

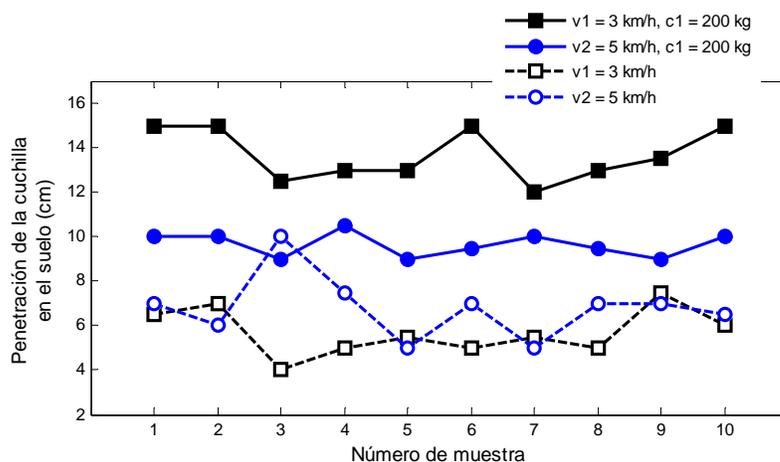


Figura 5.12. Penetración de las cuchillas en el suelo al agregar una carga adicional de 200 kg en el implemento.

Al incrementar el peso adicional de 400 a 500 kg, los cambios en la profundidad de corte de las cuchillas en el suelo no presentaron diferencias significativas (Figura 5.13).

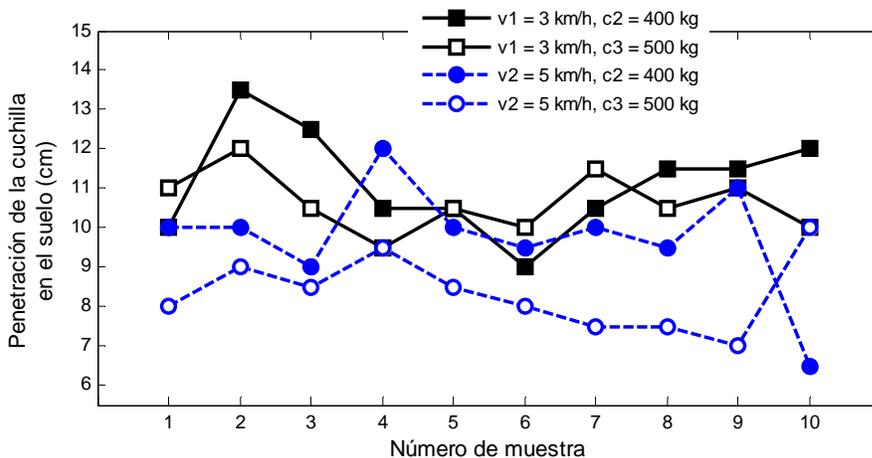


Figura 5.13. Penetración de las cuchillas en el suelo al agregar una carga adicional de 400 y 500 kg en el implemento.

En este caso el parámetro a considerar es la velocidad de trabajo, la cual al incrementarse de 3 a 5 km h⁻¹ para los pesos adicionales de 400 y 500 kg, la penetración de las cuchillas varía entre el 5 y 36%.

5.5 CONCLUSIONES

La mejor combinación de velocidad y carga adicional que permiten una penetración apropiada de las cuchillas del rodillo aireador en el suelo, para mejorar la aireación e infiltración del agua de lluvia, fue la velocidad de avance de 3 km h⁻¹ con una carga adicional de 200 kg.

En el suelo mayor con mayor humedad, la carga adicional de 400 kg permitió la penetración de las cuchillas en el suelo sin dificultad. Aun en la condición de menor humedad, el peso adicional de 400 kg es suficiente para que los elementos de corte penetren en el suelo con la velocidad de trabajo de 3 km h⁻¹.

La penetración de las cuchillas en el suelo presentó un comportamiento inverso a la velocidad de trabajo, es decir, al incrementar la velocidad de avance la penetración de las cuchillas disminuyó.

En la misma velocidad de trabajo, la penetración de las cuchillas en el suelo es proporcional a la carga adicional en el implemento, siempre y cuando el incremento de la carga adicional sea considerable respecto al peso del implemento.

La penetración de las cuchillas en el suelo es proporcional a la humedad del suelo, de esta manera, al incrementar la humedad del suelo la penetración de las herramientas de corte aumenta.

Como el rodillo aireador solo rompe el suelo en donde las cuchillas penetran el suelo, y deja intactas las áreas entre las hileras formadas por las hendiduras, es

recomendable aumentar el número de cuerpos porta-cuchillas y reducir la distancia entre estos, y distribuir el ángulo entre las cuchillas en los discos porta-cuchillas, para no volver a pasar y compactar con el peso del tractor y el implemento.

Se observó que la penetración de las cuchillas en el suelo está en función de la velocidad de avance, la humedad, compactación, tipo de suelo y el peso del implemento.

El uso del rodillo aireador en suelos agrícolas después de la cosecha del ciclo agrícola anterior, permite mejorar la aireación e infiltración del agua de lluvia, y no se degrada la estructura del suelo ni compacta el suelo ni el subsuelo.

5.6 LITERATURA CITADA

Bouma Johan. 2012. Soil compaction: Societal concerns and upcoming regulations. pp.

5-10. En: NJF seminar 448: Soil compaction – effects on soil functions and strategies for prevention. Nordic Association of Agricultural Scientists NJF Report, Vol 8 No (1) 2012. Helsinki, Finland. 120 p.

FAO. 2004. Desarrollo de la siembra directa en el Brasil tropical. FAO Agricultural Services Bulletin No. 147.

Håkansson I. 2005. Machinery-induced Compaction of Arable Soils, Incidence–Consequences–Counter-measures. Swedish University of Agricultural Sciences, Reports from the Division of Soil Management, No. 109.

<https://maps.google.com.mx>. 2014. Google Maps

Keller Thomas; Lamandé Mathieu. 2012. From soil stress to soil deformation: current state of the research. Pp. 19-21. En: NJF seminar 448: Soil compaction – effects on soil functions and strategies for prevention. Nordic Association of Agricultural Scientists NJF Report, Vol 8 No (1) 2012. Helsinki, Finland. 120 p.

- Lipiec J. 2012. Crop responses to soil compaction. Pp. 27-36. En: NJF seminar 448: Soil compaction – effects on soil functions and strategies for prevention. Nordic Association of Agricultural Scientists NJF Report, Vol 8 No (1) 2012. Helsinki, Finland. 120 p.
- McKenzie Ross H. 2010. Agricultural Soil Compaction: Causes and Management. Ph.D., P.Ag Agri-Facts.
- Schjønning P.; Heckrath G.; Christensen B. T. 2009. Threats to soil quality in Denmark: A review of existing knowledge in the context of the EU Soil Thematic Strategy. DJF Report Plant Science No. 143, The Faculty of Agricultural Sciences, Aarhus University.
- Soane B. D.; van Ouwerkerk C. 1994. Soil compaction problems in world agriculture. En: Soil compaction in crop production, p. 1-21. Eds. B. D. Soane y C. van Ouwerkerk. Holanda. Elsevier Science.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

La utilización del rodillo aireador mejora la distribución y tamaño de los agregados del suelo, y la disponibilidad de aire y agua para el crecimiento y desarrollo de las raíces de las plantas. También reduce la compactación del suelo producida por el tráfico de los animales y máquinas agrícolas de labranza. En las condiciones evaluadas, el espacio poroso ocupó aproximadamente el 50% del volumen total del suelo, y el aire ocupó más del 25%, es decir, mucho más del 10% que representa la condición crítica para que el flujo del aire en el suelo sea interrumpido y por consiguiente cese el crecimiento de las raíces (Wesseling y van Wijk, 1957) y los procesos de humificación.

Para reducir la compactación del suelo e incrementar la aireación y humedad del suelo sin degradar los agregados del suelo, se planteó el diseño, construcción y evaluación de un rodillo aireador provisto de cuchillas de corte, a partir de los análisis cinemático y dinámico de las herramientas de corte, así como de las propiedades del suelo.

La herramienta Geogebra permite calcular las trayectorias de las ecuaciones paramétricas del movimiento de las cuchillas del rodillo aireador, al rotar respecto al eje del mismo y trasladarse en la dirección de avance.

Las ecuaciones de las propiedades mecánicas permiten conocer las características de resistencia y elasticidad de las cuchillas, a través de la relación de esfuerzo-

deformación de las herramientas de corte, en función de la forma geométrica y tipo de material de construcción.

Las cuchillas asimétricas presentaron diferencias en los esfuerzos y deformaciones, y una mayor deflexión, que le permite hacer frente a condiciones de no homogeneidad en las características del suelo, lo cual es muy común, en cambio las cuchillas simétricas presentaron una mayor rigidez lo que las hace más susceptible a la fatiga e incluso a rupturas en condiciones cíclicas de operación y en suelos compactados.

Se construyeron cuchillas metálicas de geometría triangular asimétrica, las cuales fueron fijadas a discos porta-cuchillas, acoplados en un eje sólido de acero de forma equidistante.

El paso del rodillo aireador incrementó la porosidad total del suelo hasta 4.24% en las áreas con menor humedad y hasta 3.77% en las áreas con mayor humedad. En valores promedio, la humedad del suelo incrementó en 110% en las áreas con menor humedad y en 67% en las áreas con mayor humedad, mientras que el volumen del aire disminuyó en 21.88% en las áreas con menor humedad y en 16.82% en las áreas con mayor humedad.

La mejor combinación de velocidad y carga adicional que permitió una penetración apropiada de las cuchillas del rodillo aireador en el suelo, para mejorar la aireación e infiltración del agua de lluvia, fueron la velocidad de avance de 3 km h^{-1} con una carga adicional de 200 kg.

En el suelo mayor con mayor humedad, la carga adicional de 400 kg permitió la penetración de las cuchillas en el suelo sin dificultad. Aun en la condición de menor humedad, el peso adicional de 400 kg es suficiente para que los elementos de corte penetren en el suelo con la velocidad de trabajo de 3 km h^{-1} .

La penetración de las cuchillas en el suelo es proporcional a la humedad del suelo, e inversamente proporcional a la velocidad de trabajo. Si se desea incrementar la densidad de grietas en el suelo y con esto las tasas de aireación e infiltración del agua de lluvia, se puede aumentar el número de porta-cuchillas, incrementar la carga adicional y reducir la velocidad de trabajo.

CAPÍTULO 7. ANEXOS

Planos del rodillo aireador realizados en SolidWorks.

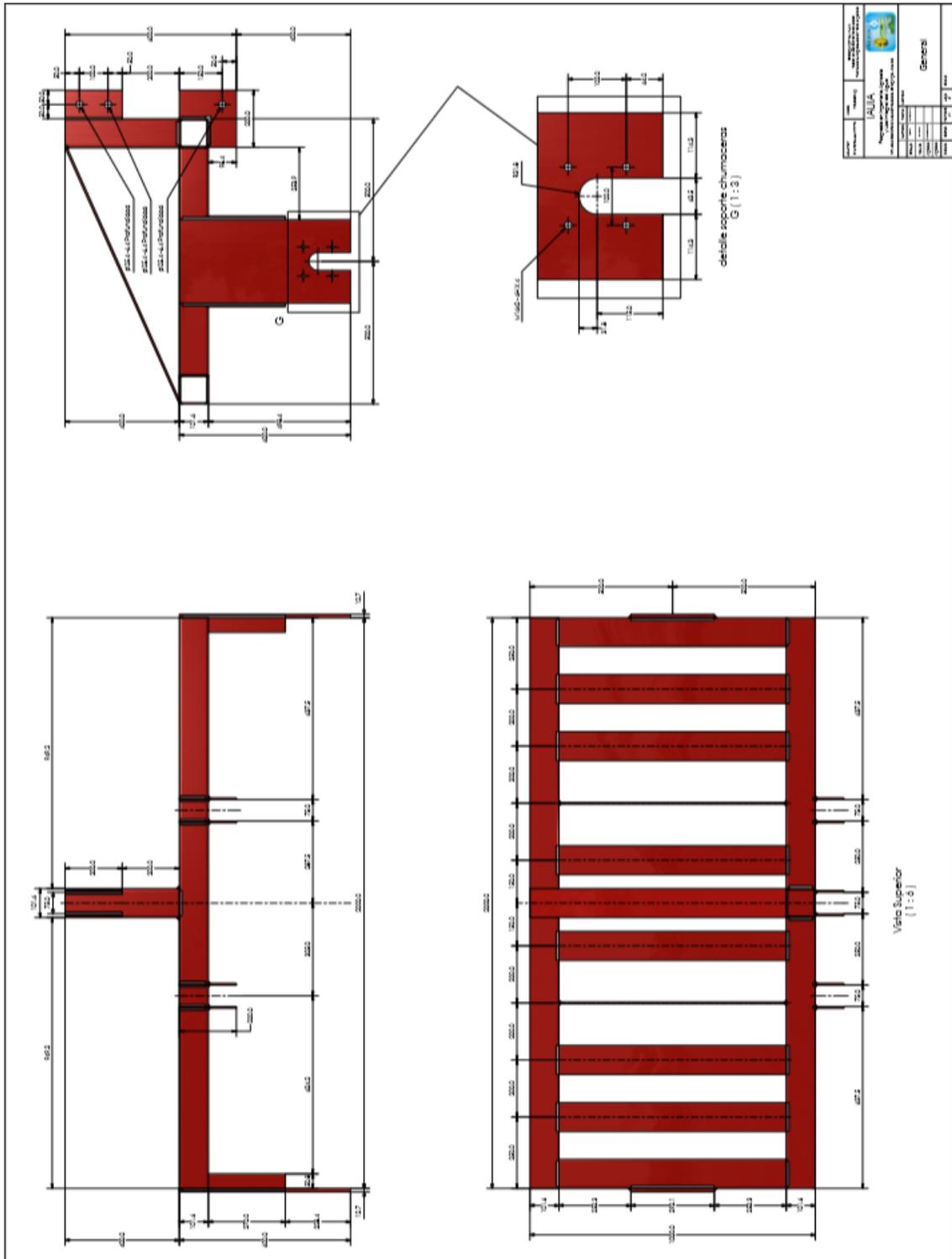


Figura 7.2. Chasis para acoplar el rodillo aireador al enganche de tres puntos del tractor agrícola.

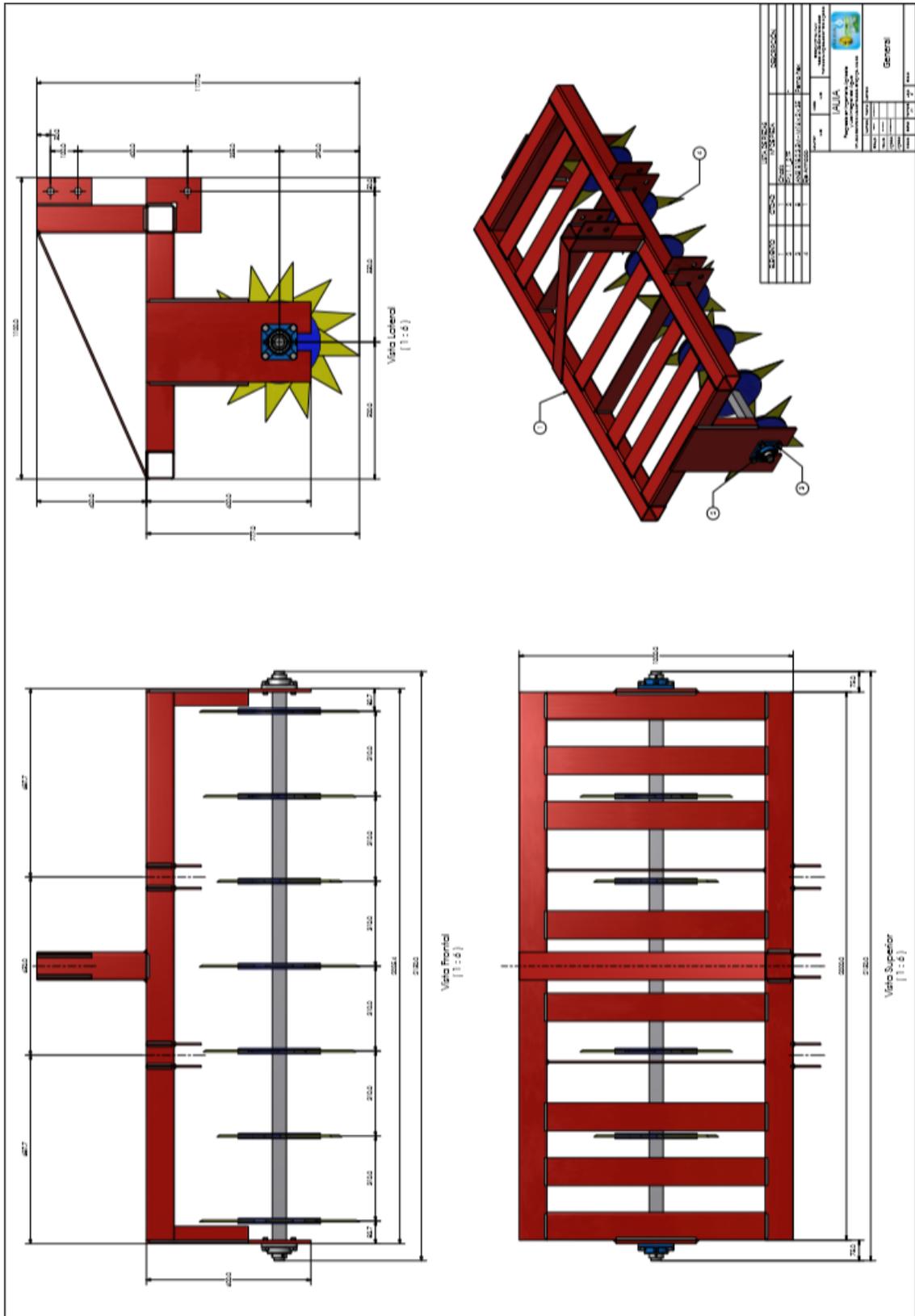


Figura 7.3. Rodillo aireador montado en el chasis.



Figura 7.4. Construcción del rodillo aireador.



Figura 7.5. Implemento del rodillo aireador enganchado en el tractor agrícola.



Figura 7.6. Rodillo aireador en operación en el campo.