

Universidad de Costa Rica  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Agrícola

---

Análisis de los niveles de compactación del suelo  
asociado a tres labores para cultivo de la caña de azúcar en el  
Ingenio Taboga.

---

Trabajo Final de Graduación  
Requisito parcial para obtener el grado de  
Licenciatura en Ingeniería Agrícola

Preparado por:  
Ing. Melissa Rojas Downing

Fecha  
01/08/2012

## Miembros del Tribunal

---

Ing. Daniel Baudrit Ruiz, MSc  
Director de Proyecto de Tesis

---

Ing. Oscar Quesada Chacón  
Miembro del Comité Asesor

---

Ing. Oscar Valerio Salas  
Miembro del Comité Asesor

---

Ing. Geovanni Carmona Villalobos  
Subdirector Escuela de Ingeniería Agrícola

---

Ing. Marcia Cordero Sandí  
Miembro del Tribunal

# Dedicatoria

---

*A mi familia, mis hermanos que gracias a todo su apoyo, amor y cariño pude cumplir paso a paso con mi licenciatura. En especial a mis abuelos Rodolfo y Marielos que pudieron ver el proceso de la realización del proyecto contando día a día con su ayuda y apoyo. Sus palabras fueron de gran aliento, y su ayuda de gran valor.*

*A mi padre quién me ha dado la mejor de las herencias, mi educación. Él me ha dado los empujones y mejores consejos para seguir adelante, además de las facilidades y apoyo incondicional para poder cumplir mis objetivos como persona y estudiante. Me ha enseñado a ser valiente y perseverante y gracias a él se lo que es disfrutar de una buena cosecha. Gracias por haber fomentado en mí el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida.*

*A mi madre que con todo su amor y dedicación soy la mujer que soy hoy en día. Siempre brindándome aliento y ayudándome en todo momento con lo necesario para poder centrarme en mis estudios.*

*A mi esposo que estuvo apoyándome día a día para poder finalizar mi profesión, sus empujones y palabras fueron de gran ayuda. Le agradezco su paciencia y su amor a través de esta etapa de mi vida.*

*A Dios por ser mi fuente de vida, mi fortaleza día a día, por darme salud y protección y por siempre estar conmigo en las buenas y en las malas y por darme una familia y vida maravillosa.*

# Reconocimientos

---

- Al PhD. Mario morales por ser mi profesor en cuanto a Física de suelos, ya que gracias a él logré entender y comprender muchos aspectos en cuanto a suelos y por ende compactación de suelos. Gracias por recibirme muchas veces y tomar de su tiempo para enseñarme y guiarme. Además le agradezco por ayudarme a realizar los análisis de laboratorio necesarios. Sin su ayuda este proyecto no hubiera sido lo mismo.
- Ing. Gabriel Hernández por haberme dado la oportunidad de realizar el estudio en uno de los Ingenios de mayor producción del país, además de apoyarme en todo momento durante el proyecto.
- Al PhD. Timothy Harrigan de la Universidad Estatal de Michigan por haberme ayudado a realizar la revisión bibliográfica del proyecto y por haberme permitido realizar otro proyecto en dicha universidad relacionado con el tema de mi tesis. Su conocimiento en cuanto al tema fue imprescindible.
- Al PhD. Ajit Srivastava por haberme dado la oportunidad de realizar la pasantía en la Universidad Estatal de Michigan y permitirme ampliar mis conocimientos en cuanto a compactación de suelos.
- Al Ing. Daniel Baudrit por su ayuda y apoyo para poder realizar una tesis distinguida aplicando los conocimientos de mecánica de suelos y de Ingeniería Agrícola.
- Al Ing. Oscar Valerio por instruirme en cuanto a mecánica de suelos y permitirme realizar todos los análisis de laboratorio necesarios para el proyecto en el Lanamme UCR.

- Al Ing. Oscar Quesada por su ayuda en cuanto a conocimientos sobre maquinaria agrícola y en la realización del proyecto.
- A los Ingenieros York Quirós Pérez, Albar Conejo Bravo, Fabricio Camacho, José Molina Palacios del Ingenio de Taboga por ayudarme en todo momento en cuanto a trabajo de campo e información necesaria.
- A los ayudantes de trabajo de campo del Ingenio de Taboga Jorge y Alonso, ya que gracias a ustedes pude obtener las muestras con mayor facilidad. Su ayuda y apoyo día a día realmente me impulso a continuar.
- Al personal del Ingenio de Taboga por facilitarme la información necesaria y ayudarme con la toma de datos en el campo.
- Al Ing. Juan Ramón Navarro Flores por tomar de su tiempo para ayudarme con el análisis estadístico del proyecto.
- A Oscar Navarrete, Reiner Villarga, Manrique Vargas y Alfredo Marchena por tomar de su tiempo para enseñarme a realizar los análisis de laboratorio en el Lanamme UCR.

# Resumen

---

La compactación del suelo en el cultivo ha aumentado en importancia mundialmente debido al uso creciente de la maquinaria para la preparación de suelo, la siembra, control de plagas, cosecha y el transporte de la caña del campo al ingenio. (Forsythe, 2006). Se han encontrado reportes internacionales en los cuales asocian una reducción del rendimiento de la producción de caña de azúcar hasta un 50%, debido a la compactación de suelos. Por lo tanto el objetivo de este trabajo es determinar los niveles de compactación de suelo asociado a tres labores de cultivo de la caña de azúcar, medido en cuatro parcelas representativas en el Ingenio de Taboga, el cual se encuentra ubicado en Cañas, Guanacaste. Para esto se utilizan las técnicas de mecánica de suelos, ya que en estudios anteriores se han utilizado para principalmente conocer la compactabilidad del suelo y además se utilizan las técnicas agronómicas. Se realiza el estudio en tres tipos de suelos: vertisol, molisol y vertisol. Se toman las muestras para la Prueba Proctor y Resistencia a la Penetración dependiendo del tipo de suelo, de cuantas cosechas se han realizado y del tipo de operación que se realizó (cosecha, subsolado, abonado o siembra). Además se obtiene la carga de la maquinaria que ha sido utilizada en cada parcela y se realizan las curvas de consolidación para determinar el punto de precompactación del suelo y así poder compararlo con las cargas de las maquinarias. Se obtienen también las curvas de retención de humedad para poder conocer el estado friable de cada tipo de suelo. Como resultado se obtuvo como factor crítico de compactación de suelos de caña de azúcar son la cosechadora, las carretas autovolteo y las carretas de semilla. Además se cuantificó que se está utilizando maquinaria muy pesada que sobrepasa los puntos de precompactación de los suelos, provocando la falla de los mismos. Asimismo se cuantificó que el objetivo del subsolado no se está cumpliendo en ninguno de los tres tipos de suelos. Y finalmente se concluye que el Molisol es el que se encuentra con mayor grado de compactación en todos los momentos.

# ÍNDICE GENERAL

1	Capítulo.....	4
1.1	Antecedentes.....	4
1.1.1	Compactación de suelos.....	4
1.1.2	Fuerzas que causan compactación de suelo.....	8
1.1.3	Ingenio Taboga.....	17
1.2	Problema.....	31
1.3	Justificación.....	31
1.4	Objetivos.....	33
1.4.1	Objetivo General:.....	33
1.4.2	Objetivos específicos:.....	33
2	Marco Teórico.....	34
2.1	Mecánica de suelos.....	34
2.1.1	Prueba Proctor.....	36
2.2	Mecánica del Tractor.....	38
2.2.1	Resistencia Mecánica del Suelo.....	38
2.2.2	Trabajo del tractor en superficie plana.....	41
3	Capítulo Metodología.....	45
3.1	Descripción del área de trabajo.....	45
3.1.1	Ubicación.....	45
3.1.2	Clima.....	46
3.1.3	Suelo.....	47
3.2	Metodología.....	50

3.2.1	Selección de las parcelas .....	50
3.2.2	Obtención de muestras para análisis de clasificación de suelos.....	52
3.2.3	Obtención de muestras para análisis de Compactación de Suelos y Resistencia a la Penetración .....	53
3.2.4	Curvas de retención de humedad .....	61
3.2.5	Especificaciones de maquinaria.....	63
4	Capítulo Resultados .....	68
4.1	Porcentaje de Compactación.....	68
4.1.1	Densidad Seca.....	68
4.1.2	Densidad máxima y Humedad óptima .....	73
4.1.3	Porcentaje de Compactación.....	76
4.2	Resistencia a la penetración .....	79
4.3	Datos relacionados con maquinaria .....	91
4.3.1	Cargas de la maquinaria .....	91
4.3.2	Humedades óptimas para labores.....	95
5	Capítulo Discusión de Resultados.....	100
5.1	Limitaciones al aplicar la metodología planteada .....	100
5.2	Discusión de Resultados .....	105
6	Capítulo Conclusiones y recomendaciones .....	107
6.1	Conclusiones .....	107
6.2	Recomendaciones.....	108
7	Bibliografía.....	112
8	Anexo .....	119
8.1	Física de suelos .....	119



8.1.1	Textura de los suelos .....	119
8.1.2	Estructura de los suelos .....	123
8.1.3	Propiedades dinámicas de los suelos .....	126
8.1.4	Capacidad hídrica del suelo .....	132
8.2	Procedimientos .....	136
8.2.1	Cuarteo .....	136
8.2.2	Gravedad específica (ASTM D-854) .....	137
8.2.3	Limites Atterberg (ASTM D-4318) .....	139
8.2.4	Análisis Granulométrico (ASTM D-422) .....	141
8.2.5	Procedimiento para realizar la prueba con tamizado .....	143
8.2.6	Tabla de Criterios de SUCS .....	146
8.2.7	Método de Bouyoucos .....	148
8.2.8	Método de oxidación .....	150
8.2.9	Retención de Humedad del suelo .....	151
8.2.10	Análisis de esfuerzo máximo de corte .....	152
8.2.11	Análisis de Consolidación .....	153
8.2.12	Prueba Proctor Estándar .....	154
8.2.13	Método del cono de arena .....	157
8.2.14	Penetrómetro de mano Eijkelkamp .....	160
8.2.15	Humedad gravimétrica .....	162
8.3	Gráficos y datos .....	163
8.3.1	Porcentaje de compactación .....	163
8.3.2	Resistencia a la penetración .....	166
8.3.3	Curvas de consolidación .....	187

8.3.4	Curvas de Retención de Humedad del Suelo .....	190
8.3.5	Datos de Maquinaria .....	190

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.2.	Labranza y tráfico de maquinaria pesada compactando el suelo por debajo del piso de arado en un suelo <i>Udult</i> (Norfolk), inhibiendo la penetración de las raíces y el movimiento del agua a través del perfil del suelo. ....	11
Figura 1.3.	Profundidad de compactación a medida que aumenta la carga por eje. La presión de la llanta es de 82.74 KPa (12 psi) para todos los tamaños .....	14
Figura 1.4.	Profundidad de compactación a medida que aumenta el contenido de humedad. Tamaño de llanta 11 x 28, carga 0.75 Kg (1.650 lbs) y presión de la llanta 82.74 KPa (12 psi) .....	14
Figura 1.5 a)	Desarrollo de un cultivo en un suelo sin restricciones físicas de suelos b) y el mismo cultivo desarrollándose en un suelo que tiene un estrato de suelos compactado. ....	16
Figura 1.6.	Rastra de 16 discos .....	20
Figura 1.7.	Rufa .....	20
Figura 1.8.	Subsolador .....	21
Figura 1.9.	Arado de cincel .....	22
Figura 1.10.	Rastra de 28 discos .....	22
Figura 1.11.	Surcador.....	23
Figura 1.12.	Carretas de semilla .....	24
Figura 1.13.	Tapador.....	24
Figura 1.14.	Riego de caña de azúcar .....	25
Figura 1.15.	Cosechadora de oruga .....	26
Figura 1.16.	Quema de residuos después de la cosecha.....	27
Figura 1.17.	Escarificador .....	28
Figura 1.18.	Aplicación de fertilizante .....	29
Figura 1.19.	Incorporador .....	29

Figura 2.1 Curva de humedad- peso específico de un suelo cohesivo.....	35
Figura 2.2. Curvas de humedad- peso específico para diferentes energías de compactación .....	36
Figura 2.3 Análisis de fuerza en un tractor .....	42
Figura 2.4 Transferencia y adición de peso de una herramienta .....	44
Figura 3.1 Selección de parcelas.....	51
Figura 3.2. Variables de los tratamientos para la obtención de muestras para el análisis de Compactación de Suelos y Resistencia a la Penetración.....	55
Figura 3.3 Método del cono de arena .....	58
Figura 3.4 Toma de datos de Resistencia a la penetración utilizando el Penetrómetro ....	58
Figura 3.5 Datos en el entresurco y en el surco. ....	59
Figura 3.6 Profundidad de toma de datos con penetrómetro .....	59
Figura 3.7 Toma de muestras de humedad.....	60
Figura 3.8 Olla de presión .....	63
Figura 4.1. Densidad aparente obtenida en diferentes operaciones mecanizadas en parcelas con siembra de caña de azúcar .....	70
Figura 4.2. Vertisol- Parcela 1, después de siembra. Contracción del suelo.....	71
Figura 4.3. Densidad aparente obtenida en diferentes operaciones mecanizadas en parcelas con retoño de caña de azúcar .....	71
Figura 4.4. Vertisol- Parcela 3, después de subsolado y riego. Contracción del suelo. ....	72
Figura 4.5. Densidad aparente de parcelas con siembra y su densidad máxima.....	74
Figura 4.6. Densidad aparente de parcelas con retoño y su densidad máxima.....	74
Figura 4.7. Porcentaje de compactación para las parcelas con retoño .....	77
Figura 4.8. Porcentaje de compactación para las parcelas con siembra .....	78
Figura 4.9. Resistencia a la penetración para cada momento a 15 cm de profundidad en la Parcela 1 .....	80
Figura 4.10. Resistencia a la penetración para cada momento a 30 cm de profundidad en la Parcela 1.....	81

Figura 4.11. Resistencia a la penetración para cada momento a 60 cm de profundidad en la Parcela 1.....	82
Figura 4.12. Resistencia a la penetración para cada momento a 15 cm de profundidad en la Parcela 2.....	83
Figura 4.13. Resistencia a la penetración para cada momento a 30 cm de profundidad en la Parcela 2.....	84
Figura 4.14. Resistencia a la penetración para cada momento a 60 cm de profundidad en la Parcela 2.....	85
Figura 4.15. Resistencia a la penetración para cada momento a 15 cm de profundidad en la Parcela 3.....	86
Figura 4.16. Resistencia a la penetración para cada momento a 30 cm de profundidad en la Parcela 3.....	87
Figura 4.17. Resistencia a la penetración para cada momento a 60 cm de profundidad en la Parcela 3.....	88
Figura 4.18. Resistencia a la penetración para cada momento a 15 cm de profundidad en la Parcela 4.....	88
Figura 4.19. Resistencia a la penetración para cada momento a 30 cm de profundidad en la Parcela 4.....	89
Figura 4.20. Resistencia a la penetración para cada momento a 60 cm de profundidad en la Parcela 4.....	90
Figura 4.21. Curva de límites de consistencia del Inceptisol-Parcela 2.....	97
Figura 4.22. Curva de límites de consistencia del Molisol- Parcela 4.....	98
Figura 4.23. Curva de límites de consistencia del Vertisol- Parcela 1 .....	99
Figura 5.1. Calicata llena de agua en Parcela 1 (Vertisol).....	101
Figura 5.2. Rotura del suelo con el arado del cincel en parcela 3 (Vertisol) .....	102
Figura 5.3. Rotura del suelo con el arado de cincel en parcela 4 (Molisol).....	103
Figura 5.4. Romana utilizada para pesar maquinaria .....	103
Figura 8.1 Triángulo textural según la clasificación del USDA.....	122
Figura 8.2 Efectos de la compactación en la estructura del suelo .....	124

Figura 8.3 Relación de las formas de consistencia, con el contenido de humedad del suelo .....	127
Figura 8.4 Los factores dinámicos de labranza en relación con la humedad del suelo y el intervalo de plasticidad. (El valor máximo de cada uno de los valores se ha tomado como valor 100).....	130
Figura 8.5 Curva de capacidad hídrica.....	133
Figura 8.6 Influencia de la estructura en la forma de la curva de capacidad hídrica .....	134
Figura 8.7 Influencia de la textura en la forma de la curva de capacidad hídrica .....	135
Figura 8.8 Método del cuarteo .....	137
Figura 8.9 Procedimiento de la norma ASTM D-854.....	138
Figura 8.10 Procedimiento del límite líquido según la norma ASTM D-4318 .....	140
Figura 8.11 Procedimiento del Límite Plástico según la norma ASTM D-4318 .....	141
Figura 8.12. Procedimientos para análisis granulométrico por el método del hidrómetro .....	143
Figura 8.13. Procedimiento para realizar análisis granulométrico con tamizado.....	145
Figura 8.14. Colocación de una muestra de suelo en el juego de tamices .....	145
Figura 8.15. Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) ASTM D-2487 .....	146
Figura 8.16. Clasificación de suelos USCS .....	147
Figura 8.17. Carta de Plasticidad .....	148
Figura 8.18. Bouyucos.....	149
Figura 8.19. Triangulo textura .....	150
Figura 8.20. Retención de humedad, método de la olla de presión .....	152
Figura 8.21. Procedimiento para realizar curva de consolidación .....	154
Figura 8.22. Procedimiento para prueba Proctor Estándar .....	157
Figura 8.23. Determinación de la densidad del suelo utilizando el método del cono de arena.....	160
Figura 8.24. Penetrómetro de mano Eijkelkamp.....	161
Figura 8.25. Rangos de medición del manómetro .....	162
Figura 8.27. Humedad óptima y densidad máxima del Vertisol-Parcela 3 .....	163

Figura 8.28. Humedad óptima y densidad máxima del Vertisol-Parcela 1 .....	163
Figura 8.29. Humedad óptima y densidad máxima del Molisol-Parcela 4.....	164
Figura 8.30. Humedad óptima y densidad máxima del Inceptisol-Parcela 2 .....	164
Figura 8.31. Condiciones provisionales para la compactación (Clases de suelo del sistema unificado) .....	165
Figura 8.32. Clases de resistencia a la penetración.....	166
Figura 8.33. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 1, después de cosecha a 15 cm de profundidad .....	166
Figura 8.34. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 1, después de subsolado a 15 cm de profundidad .....	167
Figura 8.35. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 1, después de siembra a 15 cm de profundidad .....	167
Figura 8.36. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 1, después de cosecha a 30 cm de profundidad .....	167
Figura 8.37. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 1, después de subsolado a 30 cm de profundidad .....	168
Figura 8.38. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 1, después de siembra a 30 cm de profundidad .....	168
Figura 8.39. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 1, después de cosecha a 60 cm de profundidad .....	168
Figura 8.40. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 1, después de subsolado a 60 cm de profundidad .....	169

Figura 8.41. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 1, después de siembra a 60 cm de profundidad .....	169
Figura 8.42. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 2, después de cosecha a 15 cm de profundidad .....	170
Figura 8.43. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 2, después de subsolado a 15 cm de profundidad .....	170
Figura 8.44. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 2, después de siembra a 15 cm de profundidad .....	171
Figura 8.45. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 2, después de cosecha a 30 cm de profundidad .....	171
Figura 8.46. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 2, después de subsolado a 30 cm de profundidad .....	172
Figura 8.47. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 2, después de siembra a 30 cm de profundidad .....	172
Figura 8.48. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 2, después de cosecha a 60 cm de profundidad .....	172
Figura 8.49. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 2, después de subsolado a 60 cm de profundidad .....	173
Figura 8.50. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 2, después de siembra a 60 cm de profundidad .....	173
Figura 8.51. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 3, antes de cosecha a 15 cm de profundidad .....	174
Figura 8.52. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 3, después de cosecha a 15 cm de profundidad .....	175

Figura 8.53. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 3, después de subsolado a 15 cm de profundidad .....	175
Figura 8.54. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 3, después de abonado a 15 cm de profundidad .....	176
Figura 8.55. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 3, antes de cosecha a 30 cm de profundidad .....	176
Figura 8.56. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 3, después de cosecha a 30 cm de profundidad .....	176
Figura 8.57. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 3, después de subsolado a 30 cm de profundidad .....	177
Figura 8.58. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 3, después de abonado a 30 cm de profundidad.....	177
Figura 8.59. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 3, antes de cosecha a 60 cm de profundidad .....	178
Figura 8.60. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 3, después de cosecha a 60 cm de profundidad .....	178
Figura 8.61. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 3, después de subsolado a 60 cm de profundidad .....	178
Figura 8.62. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 3, después de abonado a 60 cm de profundidad.....	179
Figura 8.63. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 4, antes de cosecha a 15 cm de profundidad .....	180
Figura 8.64. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 4, después de cosecha a 15 cm de profundidad .....	180



Figura 8.65. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 4, después de subsolado a 15 cm de profundidad .....	181
Figura 8.66. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 4, después de abonado a 15 cm de profundidad.....	181
Figura 8.67. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 4, antes de cosecha a 30 cm de profundidad .....	182
Figura 8.68. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 4, después de cosecha a 30 cm de profundidad .....	182
Figura 8.69. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 4, después de subsolado a 30 cm de profundidad .....	183
Figura 8.70. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 4, después de abonado a 30 cm de profundidad .....	183
Figura 8.71. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 4, antes de cosecha a 60 cm de profundidad .....	184
Figura 8.72. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 4, después de cosecha a 60 cm de profundidad .....	184
Figura 8.73. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 4, después de subsolado a 60 cm de profundidad .....	185
Figura 8.74. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 4, después de abonado a 60 cm de profundidad.....	185
Figura 8.75. Curva de consolidación del Inceptisol a 15 cm de profundidad.....	187
Figura 8.76. Curva de consolidación del Inceptisol a 30 cm de profundidad.....	187
Figura 8.77. Curva de consolidación del Molisol a 15 cm de profundidad .....	188
Figura 8.78. Curva de consolidación del Molisol a 30 cm de profundidad .....	188
Figura 8.79. Curva de consolidación del Vertisol a 15 cm de profundidad.....	189
Figura 8.80. Curva de consolidación del Vertisol a 30 cm de profundidad.....	189
Figura 8.81. Curvas de Retención de Humedad de los diferentes tipos de suelo.....	190

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.1. Clases texturales del suelo (Soil Survey Staff) USDA y densidad aparente .....	5
Cuadro 1.2. Valores críticos de densidad aparente que restringen el desarrollo de la raíz para diferentes tipos de suelos .....	7
Cuadro 2.1 Valores típicos de la cohesión y el ángulo de fricción interna.....	40
Cuadro 2.2 Valores típicos de la adhesión y el ángulo de fricción suelo/metal .....	41
Cuadro 3.1 Precipitación y viento promedio mensual de Cañas, Guanacaste .....	47
Cuadro 3.2. Características de los suelos según USDA* de los lotes en estudio .....	49
Cuadro 3.3. Clasificación del suelo según SUCS* de los lotes en estudio .....	49
Cuadro 3.4. Límites de consistencia de los suelos de los lotes en estudio .....	49
Cuadro 3.5. Máxima carga mecánica que el suelo puede soportar previo al colapso.....	50
Cuadro 3.6. Cohesión del suelo ( $C'$ ), ángulo de fricción interna suelo/suelo ( $\phi'$ ) y máximo esfuerzo de corte ( $\tau_{max}$ ). .....	50
Cuadro 3.7. Análisis de clasificación de suelos realizados en el Lanamme UCR .....	52
Cuadro 3.8. Análisis realizados en el Laboratorio de Suelos de la Universidad de Costa Rica en la sede de Guanacaste .....	53
Cuadro 3.9 Equipo o método utilizado para la recolección de muestras y datos experimentales .....	55
Cuadro 3.10. Fechas de toma de muestras en cada parcela.....	56
Cuadro 3.11 Maquinaria utilizada en las cuatro parcelas de estudio .....	64
Cuadro 4.1. Valores de Materia Orgánica para las diferentes parcelas.....	69
Cuadro 4.2. Valores de Densidad máxima y humedad óptima de cada parcela.....	75
Cuadro 4.3. Porcentaje de compactación requerido para fundaciones en las parcelas en estudio .....	76
Cuadro 4.4. Puntos de precompactación para cada orden de suelo .....	92
Cuadro 4.5. Cargas máximas y mínimas aplicadas en el Molisol con cultivo en retoño .....	93
Cuadro 4.6. Cargas máximas y mínimas aplicadas en el Vertisol con cultivo en retoño .....	94
Cuadro 4.7. Cargas máximas y mínimas aplicadas en el Inceptisol con siembra de cultivo .....	94

Cuadro 4.8. Cargas máximas y mínimas aplicadas en el Vertisol con siembra de cultivo ...	95
Cuadro 4.9. Valores de C.C, P.M.P, L.P.S, L.P.I y Humedad óptima para cada parcela .....	96
Cuadro 8.1 Clasificación de las partículas del suelo según el USDA .....	120
Cuadro 8.2.Datos seleccionados para análisis de Resistencia a la Penetración de la Parcela 1 .....	169
Cuadro 8.3.Datos seleccionados para análisis de Resistencia a la Penetración de la Parcela 2 .....	174
Cuadro 8.4. Datos seleccionados para análisis de Resistencia a la Penetración de la Parcela 3 .....	179
Cuadro 8.5. Datos seleccionados para análisis de Resistencia a la Penetración de la Parcela 4 .....	186
Cuadro 8.6. Maquinaria utilizada en el lote H7- Liberianos (Parcela 4).....	190
Cuadro 8.7. Maquinaria utilizada en el lote H12- Hortigal (Parcela 3) .....	191
Cuadro 8.8. Maquinaria utilizada en el lote E3- San Jacinto (Parcela 2).....	191
Cuadro 8.9. Maquinaria utilizada en el lote J3- San Juan (Parcela 1) .....	192
Cuadro 8.10. Total de maquinaria utilizada en los 4 lotes .....	192
Cuadro 8.11. Especificaciones de modelos de tractor utilizados en los 4 lotes.....	194
Cuadro 8.12. Peso adicional en llantas traseras de los tractores.....	194
Cuadro 8.13. Especificaciones del subsolador .....	195
Cuadro 8.14. Especificaciones de los Arado de Cincel .....	195
Cuadro 8.15. Especificaciones del Surcador de Pico .....	195
Cuadro 8.16. Especificaciones de los incorporadores.....	196
Cuadro 8.17. Especificaciones de las rastras .....	196
Cuadro 8.18. Especificaciones del tapador .....	196
Cuadro 8.19. Especificaciones de la Rufa .....	197
Cuadro 8.20. Especificaciones de la Inyectora .....	197
Cuadro 8.21. Especificaciones de las abonadoras.....	197
Cuadro 8.22. Especificaciones de las carretas de semilla .....	197
Cuadro 8.23. Especificaciones de las carretas de Autovolteo.....	198

Cuadro 8.24. Peso de maquinaria especifica .....	198
Cuadro 8.25. Área de contacto de llantas y oruga de tractores .....	200
Cuadro 8.26. Cargas de Maquinaria utilizada .....	201
Cuadro 8.27. Cargas de Maquinaria utilizada en la Parcela 4 .....	202
Cuadro 8.28. Cargas de Maquinaria utilizada en la Parcela 3 .....	203
Cuadro 8.29. Cargas de Maquinaria utilizada en la Parcela 2 .....	203
Cuadro 8.30. Cargas de Maquinaria utilizada en la Parcela 1 .....	204
Cuadro 8.31. Datos de Resistencia a la penetración y % de humedad de la Parcela 1.....	205
Cuadro 8.32. Datos de Resistencia a la penetración y % de humedad de la Parcela 2.....	208
Cuadro 8.33. Datos de Resistencia a la penetración y % de humedad de la Parcela 3.....	213
Cuadro 8.34. Datos de Resistencia a la penetración y % de humedad de la Parcela 4.....	217

# Introducción

---

“El contacto del hombre con el suelo es tan universal que cada persona tiene su propio concepto de su naturaleza. Para un ingeniero, puede ser un material de construcción o de fundación donde edificar. Para el agricultor es un medio de cultivo. El niño lo utiliza para hacer muñecos de barro, y para su madre es la suciedad en las manos y vestidos que debe lavarse. Para todos nosotros, el suelo es la fuente de donde proviene nuestro alimento, vestido y abrigo.... La vida es esencial para el suelo y el suelo para la vida”. (Thompson et al, 2002)

La compactación de suelos se entiende como la compresión de una masa de suelo en un menor volumen (Raghavan et al, 1990). La densidad del suelo aumenta y el tamaño de los poros disminuye (Petersen et al, 1996). Los síntomas de compactación en suelos cultivados son: la disminución de conductividad hidráulica y tasa de infiltración, desarrollo de suelos saturados (con poca aireación) a humedades de suelo equivalentes a la capacidad de campo (Forsythe W. , 2006), aumento de escorrentía, inhibición del desarrollo de raíces y disminución de producción (Petersen et al, 1996).

La compactación de suelos causa reducción en la producción de cultivos principalmente por la maquinaria que es utilizada para todo el tipo de operaciones realizadas en el campo, y ha tenido un aumento significativo a nivel mundial (Forsythe W. , 2006). La compactación de suelos ha causado disminución de producción de cultivos desde 25 a 50% en algunas regiones de Europa y América del Norte (Eriksson et al, 1974), y entre 40% y 90% en países del oeste de África (Sloane et al, 1994).

En Europa, Beata (2010) aseguró que en 1991 el área de degradación de suelos debido a compactación en Europa podría ser igual o mayor que 33 millones de hectáreas. Investigaciones recientes han demostrado que la compactación de suelos es el tipo de degradación física de suelos más extenso en el Centro y Este de Europa. Cerca de 25

millones de hectareas se consideran compactadas ligeramente, mientras que 36 millones de hectareas han sido mayormente afectadas debido a la compactación de suelos. En Ohio, las reducciones en producciones son de 25 % en maiz , 20% en soya y 30% en avena en un periodo de mas de 7 años (Lal, 1996). Las perdidas en fincas de los Estados Unidos, debido a la compactación se han estimado en \$1.2 billones por año (Gill, 1971).

Existen varias fuerzas que producen compactación en el suelo: a) natural, tales como el impacto de las gotas de lluvia y b) inducidas por el hombre, tales como operaciones de labranza, el tráfico de la maquinaria y mínima rotación de cultivos (University of Minnesota Extension, 2001).

Existen por otra parte, algunas alternativas para mitigar la compactación de suelos tales como el control de labranza y el tráfico de la maquinaria, drenaje, materia orgánica y prácticas de cultivo (Kay, 1990). En el caso de labranza se utilizan diferentes tipos de subsoladores para promover la disgregación del suelo. Y para el control del tráfico tomando en cuenta las presiones ejercidas al suelo se puede disminuir la compactación de suelos.

El drenaje es una alternativa para reducir compactación de suelos debido a que el contenido de humedad del suelo es el más importante de los atributos, y es mejor labrar en suelos secos que húmedos (Camargo et al, 1997). El contenido de materia orgánica en suelos tiende a producir agregados más estables y fuertes para resistir la compactación (Daum, 1996). Y finalmente las prácticas de cultivo promueven el crecimiento de las raíces de las plantas a través de suelos compactados produciendo rotura y diversidad biológica (McKenzie, 2010).

A pesar de que la labranza es usualmente una solución para la compactación de suelos (Chen et al, 2009), puede no ser la mejor solución debido a que fomenta la descomposición de materia orgánica, rompiendo los agregados del suelo y debilitando la estructura del suelo (Brady et al, 2008). Richard et al (2001) menciona “ Para la mayoría de suelos la compactación reduce el volumen de grandes poros y consequentemente afecta las propiedades de retención de agua y conductividad hidraulica en el rango de altos

contenidos potenciales de agua”. La labranza y el tráfico de la maquinaria modifican la porosidad del suelo y la distribución de poros, promoviendo cambios en las insaturadas propiedades hidráulicas de la capa labrada.

El uso de “raíces de plantas como herramienta de labranza” para mitigar la compactación de suelos es una atractiva alternativa (Elkins, 1985). Raíces de algunas plantas parecen capaces de penetrar suelos muy densos, dejando atrás canales que mejoran el movimiento del agua y la difusión gaseosa a través del suelo (Barley, 1954), ofreciendo una solución práctica a la compactación de suelos (Elkins, 1985).

# 1 Capítulo

## 1.1 Antecedentes

### 1.1.1 Compactación de suelos

Compactación de suelos se define como la compresión de suelo no saturado acompañado por la expulsión de aire (Forsythe W. , 2006). La condición resultante se debe al incremento en el esfuerzo mecánico, la densidad aparente (compresión de partículas sólidas), espacio aéreo (reacomodo de partículas y cambios en contenidos líquidos y gaseosos) y una disminución de la porosidad (compresión del contenido líquido y gaseoso dentro del espacio poroso) (Harris, 1971), cambiando el “ambiente del suelo” y afectando todos los procesos del suelo (Raghavan et al, 1990).

La compactación de suelos puede ser evaluada a través de varias propiedades de los suelos, tales como: resistencia a la penetración, densidad aparente, porosidad e infiltración del agua. Un suelo con un gran contenido de partículas finas (limo y arcillas) tiene diámetros de poros mas pequeños y mayor resistencia a la penetración a una baja densidad aparente que un suelo con gran contenido de partículas gruesas (Daddow et al, 1983).

La densidad aparente puede ser utilizada como indicador de compactación; sin embargo la densidad aparente es un dato específico del sitio y no se puede aplicar la misma información en otros lugares. El uso de la resistencia a la penetración no sufre tal problema debido a que sus valores son universales (Forsythe W. , 2006).

La densidad aparente es igual a la masa del suelo seco en una unidad con un volumen conocido que fue tomada en condiciones de campo  $\rho = \frac{M_s}{V_t}$  (Ecuación 1.1) (Hillel, 1998).

$$\rho = \frac{M_s}{V_t} \quad (\text{Ecuación 1.1})$$



Donde:

$p$  = Densidad aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$M_s$  = Masa de suelo seco (g)

$V_t$  = Volumen del anillo ( $\text{cm}^3$ )

La densidad aparente es dependiente de la textura del suelo, de las densidades del suelo mineral (arena, limo y arcilla) y de las partículas de materia orgánica, así como el acomodo de partículas. La densidad aparente también cambia dependiendo del cultivo, practicas de labranza que afectan la superficie del suelo, la materia orgánica, la estructura del suelo y porosidad (USDA, 2008).

USDA.NRCS presenta un cuadro en el cual se expresan los valores medios de densidad aparente dependiendo del tipo de suelo, es decir debido a la forma, tamaño y arreglo diferencial de las partícula de arena y arcilla (Cuadro 1.1). Por eso, se debe tomar con mucho cuidado al considerar un valor absoluto como referencia para concluir si un suelo esta compactado o no.

Cuadro 1.1. Clases texturales del suelo (Soil Survey Staff) USDA y densidad aparente

<b>Clases Texturales</b>	<b>Densidad Aparente (<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>)</b>
Arena	1.70- 1.80
Arena gruesa	1.60- 1.70
Arena y Arena fina	1.55- 1.65
Arena franca	1.60- 1.70
Arena franca gruesa	1.55- 1.65
Arena franca. Arena franca fina	1.55- 1.60
Feanco arenosa	1.55- 1.60

Franco arenosa gruesa y Franco arenosa y Franco arenosa fina	1.50- 1.60
Franco arenosa muy fina	1.45- 1.55
Franca y franco limosa	1.45- 1.55
Limo	1.40 – 1.50
Franco arcillosa	1.40- 1.50
Franco arcillo arenosa y Franco arcillo limosa	1.45- 1.55
Arcilla arenosa	1.35- 1.45
Arcilla limosa	1.40- 1.50
Arcilla (35-50%)	1.35- 1.45
Arcilla (50-65%)	1.25- 1.35

Según las investigaciones en el área agronómica la compactación adquiere su máxima intensidad solamente en la consistencia plástica o sea, cuando el suelo tiene un contenido de agua igual a la “capacidad de campo” (Raghavan et al, 1990). En cuanto a la densidad, se considera valores críticos de  $1.70 \text{ g/cm}^3$  para suelos francos y suelos franco arcillo arenosos y de  $1.4 \text{ g/cm}^3$  para suelos arcillosos (Cuadro 1.2), ocurriendo restricción en el desarrollo radicular cuando los suelos estuvieron a “capacidad de campo” (USDA.NRCS, 1996).

Cuadro 1.2. Valores críticos de densidad aparente que restringen el desarrollo de la raíz para diferentes tipos de suelos

Textura	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )
Gruesa, media y fina arena y arenas francas	1.80
Muy fina arena y franco muy fino	1.77
Franco arenoso	1.75
Franco, Franco arenoso arcilloso	1.70
Franco arcilloso	1.65
Arenoso arcilloso	1.60
Limo, Franco limoso	1.55
Franco arcilloso limoso	1.50
Limo arcilloso	1.45
Arcilloso	1.40

Fuente: USDA.NRCS (1996)

Para el caso específico de la caña de azúcar Rangeon et al (2008) realizó una investigación en la cual asegura que la resistencia a la penetración y la densidad del suelo son los atributos físicos que influyen directamente en el crecimiento de las raíces y en consecuencia, los brotes de la caña de azúcar. Además aclara que el efecto del impedimento mecánico al desarrollo de las raíces depende de las características del suelo y las prácticas a que el suelo está sometido. Cuando aumenta la resistencia a la penetración de suelo, el sistema de raíces reduce el desarrollo y puede comprometer la productividad de la zona.

USDA (2008) da ciertas recomendaciones como prácticas de conservación resultando favorables para la densidad aparente del suelo, tales como:

- Conservación con cultivos de rotación: el uso de sistemas multi- cultivos involucrando plantas con raíces de diferentes profundidades pueden ayudar a romper capas de suelos compactados.
- Cultivo de cubierta: es un sistema que utiliza cultivos de cubierta, residuos de cultivo, césped perenne y o reducción de labranza lo cual resulta un incremento en la cantidad de materia orgánica, menos perturbación y reducción de la densidad aparente.
- Labranza profunda: mejora la estructura del suelo, disminuye la densidad aparente y altera las capas compactadas de suelo.

En cuanto al utilizar cultivo de cubierta en caña de azúcar, la cosecha priva al suelo de un regular suministro de material vegetativo tan necesario para mantener la materia orgánica y esto se puede mitigar al cosechar la caña de azúcar verde. Cuando se quema la caña de azúcar la superficie del suelo no es protegida del impacto directo del sol y la lluvia y bajo dichas circunstancias la temperatura del suelo tiende a ser alta, acelerando la mineralización de la materia orgánica, resultado en un bajo contenido de materia orgánica (Bakker, 1999). Cosechar caña de azúcar verde permite la acumulación de biomasa, favoreciendo la fijación de Nitrogeno, eliminando semillas no deseadas y mejorando la estructura del suelo (Augstburger et al, 2000).

### 1.1.2 Fuerzas que causan compactación de suelo

Existen dos tipos de fuerzas que pueden actuar sobre el suelo y causar compactación, ellas son clasificadas como interna y externa. Las fuerzas externas son: tráfico de maquinaria, animales, personas y agua (Agüero, 1983). Las fuerzas internas son ciclos tales como el secado y el humedecimiento, contracción y expansión de la masa del suelo (Camargo et al, 1997).

Todas estas fuerzas representan el efecto neto de procesos que cambian la forma estructural del suelo a diferentes escalas y tasas, alterando las características de los poros, zonas de falla y agregados en suelos (Kay, 1990).

### **1.1.2.1 Fuerza externa: Labranza y Tráfico de Maquinaria**

Se ha demostrado que las capas compactadas de suelo se rompen de manera natural mediante el ciclo de húmedo a seco, tal y como sucede en los suelos arcillosos. Pero cuando el suelo compactado persiste se puede necesitar algún tipo de laboreo para romper la capa dura físicamente. (McKenzie ,2010).

Los efectos de labranza en la estructura del suelo difieren de acuerdo al tipo de fuerza que actúa y a la localización de la acción. Los impactos directos destruyen agregados, producen compactación y cambios desfavorables en el tamaño y estructura de los poros (El Titi, 2003).

Barzegar et al (2000) indica que la compactación del suelo con cultivo de caña de azúcar aumenta durante la preparación de suelos, siembra, practicas culturales y particularmente la cosecha. Además Bell et al (2001) también muestra que la ausencia de rotación junto con inadecuadas practicas de manejo, así como el intenso tráfico de maquinaria produce degradación de suelos y reduce la productividad.

Pero la labranza también puede ser utilizada para mitigar la compactación de suelos permitiendo un adecuado desarrollo de las raíces, como por ejemplo las labranzas producidas debajo de 35 cm de profundidad, referidas como subsolado (Mich, 1999). También están las labranzas conducidas por un implemento con una herramienta delgada, la cual es insertada a menos de dicha profundidad y es conocida como la aradura de cincel. Es importante observar que el subsolado debería de ser realizado con el correcto contenido de humedad, sino se producirá más daño que beneficio, ya que en un suelo húmedo se formará el piso de arado (Raper et al, 2006). Además es importante señalar que la labranza puede reducir el problema de toda la compactación, pero no podrá dirigirse a las fuentes del problema. (McKenzie ,2010).

El beneficio mayor del subsolado es la profunda desagregación de capas compactadas en los subsuelos. Si la compactación de suelos es excesiva en esas capas, las raíces no pueden penetrar y se restringen a mayores profundidades (Raper et al, 2006). El otro beneficio del subsolador es el incremento de número de macroporos que usualmente

se encuentran después del subsolado, el cual contribuye con el incremento de la infiltración (Xu et al 2001).

Una buena labranza es esencial para la producción de caña de azúcar debido a que el cultivo permanece en el campo por 5 o más años inclusive (Muturi et al, 2008), por lo tanto subsolar utilizando un solo brazo oscilatorio puede aumentar la macroporosidad produciendo una baja densidad aparente (Bandalan et al, 1999) y esto fue confirmado por Naseri et al (2007) mostrando resultados que subsolando el suelo con un subsolador de doble brazo soltó el suelo a profundidades de 0 a 60 cm.

En Costa Rica MAG (1991) recomienda el uso del subsolador, en caña de azúcar, durante la preparación de suelos a una profundidad de 50 a 60 cm y con una separación de corte de 1.5 m. Y como manejo de suelos después de la cosecha MAG (1991) recomienda un paso de arado de cincel entre los surcos a una profundidad de 50 cm.

En el caso del tráfico de maquinaria, se considera que los mayores daños causados por la compactación se producen en la primera pasada de la maquinaria e implementos. Como el número de pases en el mismo lugar aumenta, hay un aumento en la compactación, a raíz de una escala logarítmica. (Camargo, 2006).

Fernández et al (1983), después del primer corte en un suelo arcilloso y con una humedad gravimétrica de 32% demuestra que con 1, 2 y 3 pasadas de un camión con apenas un eje trasero y 16 toneladas de masa; la producción disminuyó en 10 toneladas por hectárea con solo una pasada siendo constante este valor en los demás escenarios con respecto al testigo sin tráfico. Se observó también un aumento en el número de tallos no influyendo en la producción final. En numerosos experimentos, se concluye que un 50-60 % de la compactación se manifiesta con las primeras pasadas de vehículos e implementos.

El cultivo se puede ver también afectado por la capa compacta en el fondo de la zona de labranza, formada por una combinación de arada y otras operaciones de labranza, esto es más conocido como el piso de arado (Baver et al, 1972), tal y como se observa en la Figura 1.1, el cual se da a una profundidad de 18 cm y se produce un piso de arado de

24 cm. Como la zona por encima de esta capa es arada y labrada con regularidad, la compactación solo se observa por debajo de esta capa. Ya a partir de los 42 cm se encuentra una capa no compacta del subsuelo.

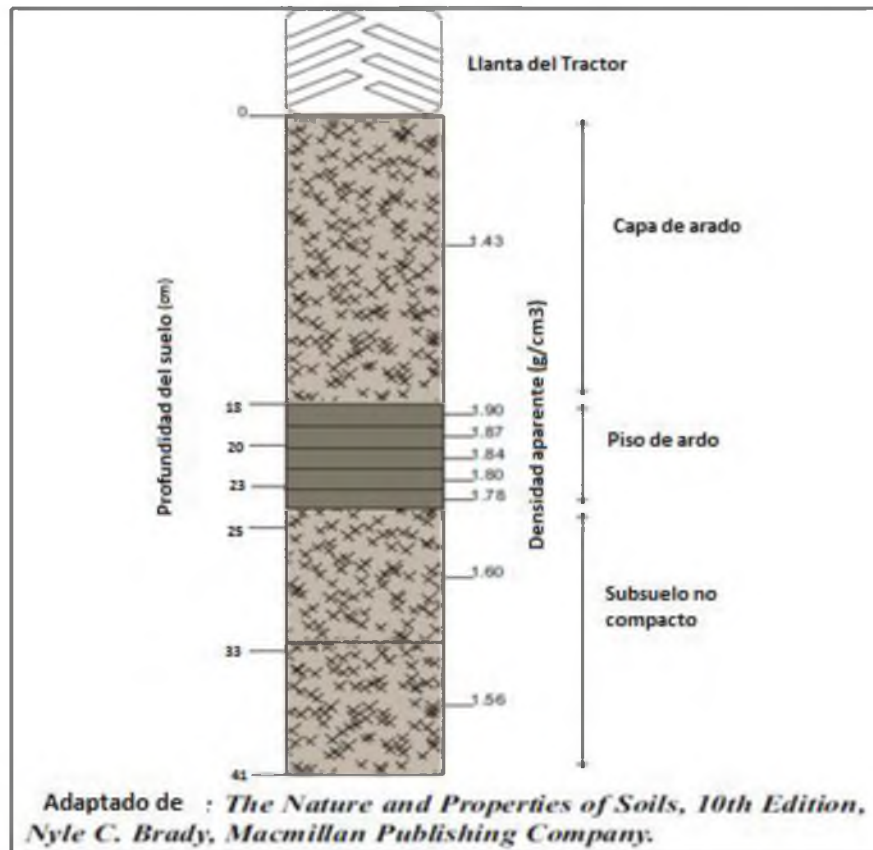


Figura 1.1. Labranza y tráfico de maquinaria pesada compactando el suelo por debajo del piso de arado en un suelo *Udult* (Norfolk), inhibiendo la penetración de las raíces y el movimiento del agua a través del perfil del suelo.

Fuente: USDA, 2008

Uno de los procesos para mitigar compactación de suelos debido al tráfico de maquinaria es el llamado tráfico controlado. El sistema de tráfico controlado separa las zonas de tráfico de las zonas donde se encuentra el cultivo en el campo. Las producciones normalmente se mejoran cuando el tráfico es restringido para controlar las zonas entre los surcos debido a que el suelo que se encuentra directamente por debajo de los surcos puede retener una estructura suelta (USDA, 2003) .

Pero es de suma importancia tomar en cuenta el periodo en que se rotura todo el lote y se prepara para una nueva siembra, ya que debido a esto puede suceder lo contrario tal y como lo presentaron Braunack et al (2000) en una investigación en Australia donde la cosecha de la caña de azúcar se realiza mediante cosechadoras y se traslada la cosecha hacia las fábricas con vagones y tractores considerados equipos pesados. Los estudios presentan que el tráfico sobre el surco donde se ubica la cepa tiende a disminuir la producción en el próximo retoño comparado con el tráfico cerca o en el entresurco.

También indican que en el caso de caña de azúcar, a pesar del lote estar dividido en dos zonas, una para el paso de las llantas y otra para el desarrollo del cultivo, la compactación del tráfico afecta ambas zonas, reduciendo la infiltración y limitando el desarrollo de las raíces en una pequeña área (Naseri et al, 2007). Esto sucede porque la presión aplicada se trasmite a capas que se encuentran más abajo y eventualmente se da la posibilidad de la formación de capas profundas con alta densidad aparente y baja permeabilidad (McGarry et al, 2001).

Existen dos importantes componentes del sistema de tráfico controlado: a) asegurarse que todo el equipo cubre la misma distancia de siembra de cultivo o múltiplos de dicha distancia y b) minimizar el número de vías de tráfico (USDA, 2003).

Un sistema de labranza de conservación puede reducir la necesidad del tráfico de maquinaria en el campo, ya que se utilizan menos operaciones de labranza, tales como siembra, pulverización (si fuera necesario), cosecha y establecimiento del cultivo de cobertura (Raper et al, 2006).

La compactación de suelo se reduce con una disminución del intensivo tráfico de maquinaria. Se ha reportado un aumento en la compactación de suelos cuando los productores cambian a sistemas de conservación de labranza (Potter et al, 1993), sin embargo el aumento es temporal y no afecta negativamente los cultivos y más bien originará un incremento en la infiltración y reducirá la escorrentía (Raper et al, 2006).



Los sistemas de conservación de labranza usualmente incrementan la actividad biológica, la cual produce un aumento de macroporos y estructuras de suelo más rígidas y mejoradas (El Titi, 2003). Dichos macroporos permiten el aumento de infiltración y de hecho permiten el aumento de la productividad total debido al incremento del almacenamiento del contenido de humedad del suelo, incluso en suelos con altas densidades (Raper et al, 2006).

Además existen un par de causas que se encuentran relacionadas con la labranza y el tráfico de maquinaria que pueden compactar el suelo:

- El tráfico durante altos contenidos de humedad del suelo: cuando el suelo se encuentra seco, este tiene alta resistencia del suelo haciéndolo menos susceptible a la compactación. Un suelo seco soporta mejor el tráfico que un suelo húmedo. Además la presión producida por la llanta será transmitida a mayores profundidades en suelos húmedos (Petersen et al, 1996).
- Tractores con alta carga por eje: esto producirá compactación de suelos a mayores profundidades. A medida que el tractor es más pesado la presión se trasmite a mayores profundidades en el suelo (Petersen et al, 1996).

El término “carga por eje” fue creado para definir la cantidad que es aplicada al suelo por cada eje bajo el vehículo (Raper et al, 2006). La compactación causada por altas cargas por eje (mayores a 10 toneladas por eje) en suelos húmedos se puede extender hasta profundidades de más de 0.6 m ( Figura 1.2 y Figura 1.3).

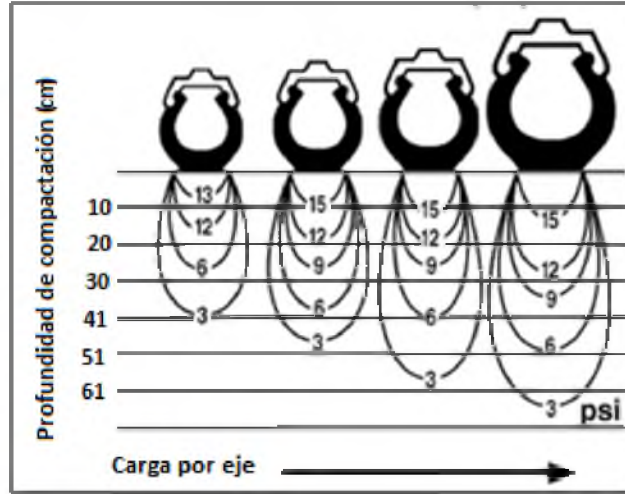


Figura 1.2. Profundidad de compactación a medida que aumenta la carga por eje. La presión de la llanta es de 82.74 KPa (12 psi) para todos los tamaños

Fuente: Söhne (1958)

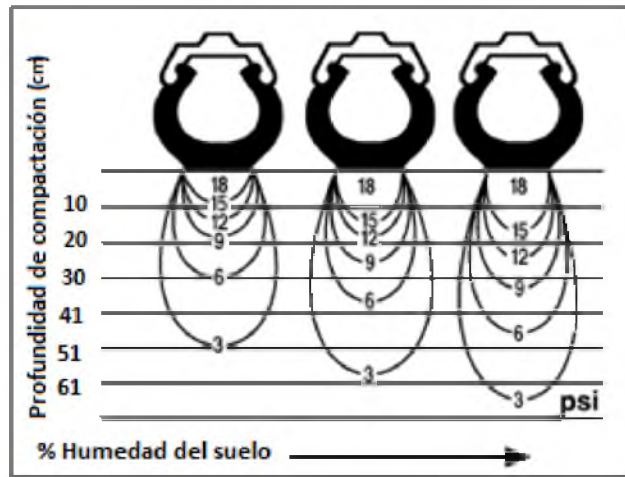


Figura 1.3. Profundidad de compactación a medida que aumenta el contenido de humedad. Tamaño de llanta 11 x 28, carga 0.75 Kg (1.650 lbs) y presión de la llanta 82.74 KPa (12 psi)

Fuente: Söhne (1958)

Un estudio de investigación realizado en Lamberton, Minnesota (Voorhees et al, 1984) ilustra este efecto. El suelo arcillo limoso fue compactado con 10 y 20 ton de carga por eje. Cuando el suelo estuvo seco, la mayoría del aumento de densidad aparente se dio en los primeros 12 cm y no se vio algún cambio de densidad aparente a los 46 cm de

profundidad. Bajo condiciones de suelo humedo la carga por eje de 20 toneladas compacto el suelo a profundidades mayores que 46 cm.

Algunos experimentos evalúan el efecto de la carga por eje desiguales determinando que las presiones del suelo a profundidades de 50 cm aumentaban al incrementar la carga por eje (Taylor et al, 1980). Otros estudios experimentales han encontrado que, incrementos en la carga por eje a constante presión de inflado de las llantas, aumentaba la resistencia a la penetración, la densidad aparente del suelo a poca profundidad y la densidad aparente a profundidades cerca del piso de arado (Bailey et al, 1996). Estos estudios señalan la necesidad de reducir el peso de la maquinaria como primer método para reducir la facilidad de la maquinaria para compactar el suelo a mayores profundidades.

Distribuir la carga en la superficie del suelo ha sido un método efectivo para reducir la compactación de suelos, especialmente en el primer perfil. Sin embargo el aumento de ejes también significa cargas repetidas, que también pueden contribuir al incremento de la compactación de suelos (Raper et al, 2006).

Llantas dual o a bajas presiones distribuyen el peso y son utilizadas para mitigar la compactación de suelos. La reducción de la presión de la llanta no reduce la compactación del subsuelo, solamente reduce la superficial (Petersen et al, 1996).

Incrementar el tamaño de la llanta es más favorable como método para reducir la densidad aparente y la resistencia a la penetración que aumentar el número de ejes (Bedard et al, 1997), si el sistema del cultivo permite llantas con un incremento del ancho sin compactar los surcos cercanos.

### ***1.1.2.2 Efectos en el suelo debido a la compactación***

Los efectos más importantes en el suelo debido a la compactación son: incremento de la resistencia mecánica a la penetración, reducción de la aireación e infiltración de agua, alteración de la temperatura y la disponibilidad de nutrientes (Camargo et al, 1997). Pero para efectos de esta investigación se discutirá solamente la resistencia a la penetración.

La resistencia mecánica ofrecida por el suelo para permitir un crecimiento de las raíces de las plantas es una función de la resistencia del suelo. La resistencia del suelo es la habilidad del suelo para resistir ser movido al aplicarse una fuerza sobre el mismo. Cuando la compactación incrementa la resistencia del suelo, las raíces deben ejercer mayor fuerza para poder penetrar la capa compactada (University of Minnesota Extension, 2001). La resistencia mecánica y el poco oxígeno suministrado debido a la compactación restringe la resistencia a la penetración de las raíces (USDA, 2003).

En suelos de “alta resistencia” los esfuerzos necesarios para agrandar los poros debe ser mínima para permitir la fácil penetración de las raíces (Barley, 1954). Sin embargo en suelos con “moderada resistencia” las magnitudes de las fuerzas que resisten el agrandamiento de poros deben ser tan altas que la extensión de las raíces es muy restringida al menos que existan canales suficientemente largos para que las raíces entren fácilmente.

### 1.1.2.3 Efectos en el cultivo debido a la compactación

Los efectos de la compactación producen un menor desarrollo del sistema radical de las plantas y, por lo tanto, un menor desarrollo de la planta en su conjunto, lo que redundará en una menor producción (Figura 1.4).

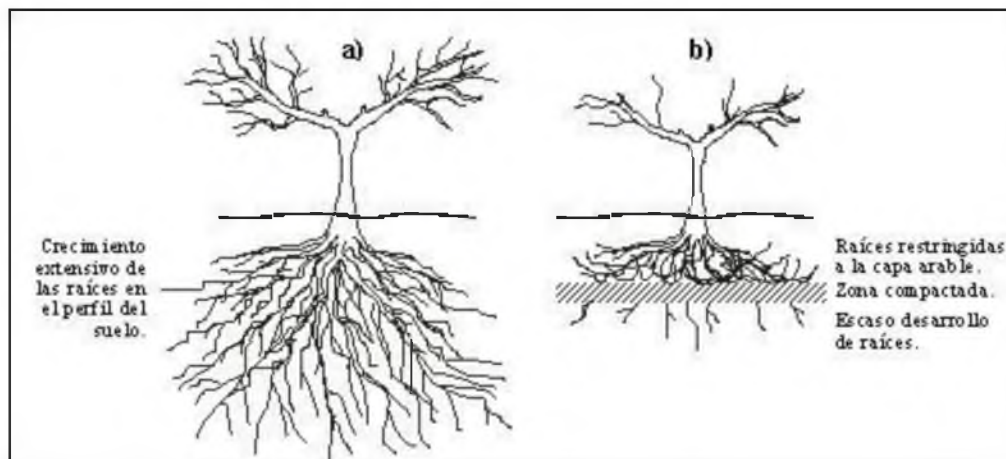


Figura 1.4 a) Desarrollo de un cultivo en un suelo sin restricciones físicas de suelos b) y el mismo cultivo desarrollándose en un suelo que tiene un estrato de suelos compactado.

De los factores mencionados, son dos los que van a tener un efecto directo sobre el crecimiento de las raíces, estos son (Forsythe W. , 2006):

- Aumento de la resistencia mecánica del suelo.
- Disminución de la macroporosidad del suelo.

El aumento de la resistencia mecánica del suelo va a restringir el crecimiento de las raíces a espacios de menor resistencia, tales como los que se ubican entre las estructuras (terrones), en cavidades formadas por la fauna del suelo (lombrices) y en espacios que se producen por la descomposición de restos orgánicos gruesos (raíces muertas). Esta situación va a producir un patrón de crecimiento característico de raíces aplanadas, ubicadas en fisuras del suelo, con una escasa exploración del volumen total del suelo (Baver et al, 1972).

La disminución de la macroporosidad del suelo va a producir una baja capacidad de aireación y oxigenación del suelo, lo que va a producir una disminución de la actividad de las raíces y, consecuentemente, un menor crecimiento de éstas, un menor volumen de suelo explorado, una menor absorción de agua y nutrientes. Este efecto se agrava cuando se riega en forma excesiva, llegando a producirse la muerte de las raíces por asfixia. Esto debido a que los escasos macroporos que pueden airear el suelo van a permanecer llenos de agua gran parte del tiempo (Baver et al, 1972).

### 1.1.3 Ingenio Taboga

El Ingenio Taboga cuenta con 4,685.5 hectáreas de fincas propias y administradas cultivadas de caña, de las cuales 3,958 hectáreas son fincas propias cultivadas de caña.

Las prácticas que realiza el Ingenio para evitar la degradación del suelo son: devolver al suelo gran parte de los nutrimentos, reincorporando como abono orgánico las cenizas y la cachaza. También incorporan como fertilizante la vinaza, efluente líquido de la destilación del alcohol. Utilizan equipos mecánicos de alta flotación para proteger y evitar la compactación de los suelos y nivelan los terrenos para maximizar el riego y evitar la

erosión. Reincorporan los desechos vegetales al suelo de las plantaciones en las áreas cosechadas mecánicamente en verde.

En cuanto a compactación de suelos, la experiencia personal del Ingenio de Taboga indica que es un subproducto de la producción agrícola y que ocasiona reducción de la productividad de los cultivos, cuando no se ha tomado ninguna medida en contra de este problema y los valores de densidad aparente para los diferentes tipos de suelo son altos.

El Ingenio de Taboga utiliza el subsolado y arado de cincel como labor para disminuir el grado de compactación de suelos, ya que han comprobado cualitativamente su beneficio en cuanto a productividad y revitalización del suelo.

Los síntomas visuales de compactación en el Ingenio de Taboga son los siguientes:

- Emergencia lenta de los retoños.
- Plantas con tamaño variable.
- Plantas con coloraciones diferentes.
- Sistema radicular pobre y superficial.
- Raíces malformadas.
- Formación de costra superficial.
- Huellas de tractor.
- Dificultad de penetración en el suelo.
- Agua estancadas.
- Erosión excesiva.
- Aumento en la energía o fuerza en las maquinas cuando se trabaja con implementos para el suelo.
- Disminución en la descomposición de residuos (varios meses).
- Aumento en la densidad aparente.
- Disminución en la tasa de infiltración.

### **1.1.3.1 Preparación de suelos**

La vida útil de una plantación oscila alrededor de los 5 años, por lo que usualmente se prepara un terreno, que ha sido principalmente cosechado con maquinaria pesada, para siembra alrededor de 5 años. La preparación de terreno consiste en llevar a cabo una secuencia de labores para proporcionar a la semilla una adecuada condición en su germinación, enraizamiento, absorción de agua y nutrimentos, así como a los retoños en los años siguientes. (Subirós, 2000).

La mayor actividad del sistema radical ocurre en los primeros 40 cm de profundidad, por lo que es necesario que, al menos, a esta profundidad el suelo quede preparado. El uso excesivo de maquinaria, lejos de proporcionar beneficio perjudica notablemente, debido a que la estructura de suelo y las propiedades físicas deseables se destruyen. Esta situación constituye un obstáculo para el desarrollo radical. (Subirós, 2000).

Otros dos aspectos importantes consisten en: utilizar maquinaria con una potencia de acuerdo con el tipo de implemento que este utilizándose y en tratar de realizar la preparación durante la época seca, debido a que el paso del equipo por el campo, cuando esta húmedo, ocasiona problemas de compactación. (Subirós, 2000).

Para la preparación se suelos para siembra, se sigue el siguiente orden de labores:

#### **1. Limpieza del terreno:**

Se realiza cuando se trata de un área nueva. Esta labor consiste en la eliminación e incorporación de los residuos de cultivos anteriores. Esto facilita las siguientes labores de nivelación y preparación del suelo.

Se da una pasada del subsolador “riper” para sacar las raíces gruesas y piedras del subsuelo y dos pasadas con rastra para eliminar los terrones grandes y las malezas. Se utilizan rastras pesadas (Figura 1.9) o rastra-arado con discos de 71-91 cm (10-28 discos) y tractores de llantas (200-300 HP).



Figura 1.5. Rastra de 16 discos

## 2. Nivelación

Se realiza solo para áreas nuevas y cuando la siembra se lleva a cabo en suelos con pendientes leves, mayor al 4%. El objetivo de esta labor es proporcionar un terreno con la pendiente adecuada que permita la evacuación eficiente de las aguas de escorrentía y facilite el riego, así como hacer más eficiente la realización de las labores agrícolas y la corta mecánica. Se utiliza una rufa (Figura 1.6) movida por un tractor de oruga o de llantas, ya sea con rayo laser o no.



Figura 1.6. Rufa



### 3. Subsolado

El objetivo es eliminar las capas compactadas e impermeables mediante su fragmentación, situación producida por el uso de la maquinaria en las áreas mecanizables.

En áreas muy compactadas se pasa dos veces el subsolador. La profundidad a la que se debería subsolar varía entre los 50 y 60 cm y el distanciamiento oscila entre 1 a 1.5m dependiendo del tipo de suelo y grado de compactación.

Según lo observado en campo, en los 2 lotes de estudio no se utilizó esta maquinaria.



Figura 1.7. Subsolador

### 4. Arada

Se realiza de acuerdo al tipo de suelo y la condición en que se haya este después de finalizada la labor anterior. La arada permite fracturar mejor el suelo y voltear hasta una profundidad de 30-35 cm, con el fin de favorecer los agregados. Se utiliza principalmente el arado de cincel (Figura 1.8).

Según lo observado en campo, en los 2 lotes de estudio, se utiliza la misma maquinaria sin importar el tipo de suelo, variando el número de pasadas dependiendo del tipo de suelo. El grado de compactación no se mide antes de utilizar este implemento, por

lo que es difícil saber si de verdad se está cumpliendo con el objetivo. Y además en ambos lotes se trabajó a una profundidad de solamente 15 y 20 cm.



Figura 1.8. Arado de cincel

## 5. Rastreada

Se realiza para eliminar los terrones grandes y convertirlos en partículas de menor tamaño, lo mismo que un buen emparejamiento del lote. Permite que la labor de surcada se realice de una manera adecuada, mejorando el contacto entre la semilla y el suelo. Se utiliza una rastra de 24-36 discos de 61-66 cm y tractores de llantas de 120-180 HP (Figura 1.9).



Figura 1.9. Rastra de 28 discos

## 6. Abono-Surqueo

La labor consiste en la conformación del surco y acondicionamiento final de la cama de siembra, según la distancia entre surcos y la profundidad de siembra, con implementos de uno o dos picos e inclusive hasta tres surqueadores (Figura 1.10). La profundidad oscila entre los 20 y 35 cm. El cultivo aporque debe hacerse entre la semana 8-12. A la labor de surqueo se les puede incorporar una abonadora, para realizar ambas operaciones en una sola operación, depositando en el fondo del surco el fertilizante.



Figura 1.10. Surcador

## 7. Siembra

El objetivo es colocar el material vegetativo que dará origen a una nueva plantación. El material vegetativo debe provenir de áreas de cultivo destinados para semilla entre 6 y 8 meses de edad.

Para la siembra se utilizan carretas pesadas (Figura 1.11) las cuales acarrear la semilla a través de todo el lote, para esto van dos personas encima de la carreta arrojando la semilla para que esta sea sembrada manualmente.

Luego de la siembra se da el tapado de semilla con una capa de tierra de 5 a 10 cm, esto se realiza con un tapador y tractor de 135 HP (Figura 1.12).



Figura 1.11. Carretas de semilla



Figura 1.12. Tapador

## 8. Riego

El objetivo es suministrar el agua necesaria en oportunidad y cantidad para el normal desarrollo de las plantaciones de caña de azúcar. La aplicación del riego se efectúa por medio de sifones en los lotes de caña. El método de riego podrá ser, por surco continuo o surco alterno. La profundidad de mojado debe encontrarse a 40 cm, como mínimo. El riego de siembra debe ser no mayor a 24 horas después de la siembra (Figura 1.13).





Figura 1.13. Riego de caña de azúcar

Para el mantenimiento de los retoños durante los 5 años, se realizan las siguientes labores:

### **1. Cosecha mecanizada**

La cosechadora (Figura 1.14) cubre un área considerable por unidad de tiempo. La eficiencia depende del tipo de equipo, pero esta puede ser aproximadamente de 40 toneladas por hora e inclusive mucho más. La cosechadora avanza acompañada de una carreta autovolteo, la cual es cargada con la caña de azúcar cosechada.

La cosecha hay que hacerla cuando la planta alcance su óptimo estado de madurez, su máximo contenido de azúcar recuperable y su mínimo de humedad, sin que este secado llegue a producir el desdoblamiento del azúcar almacenado en la planta, ni a afectar la brotación del próximo ciclo del cultivo. Estos objetivos se alcanzan, con la preparación del cultivo para la cosecha, a través de un eficiente control del riego durante el período de maduración (Subirós, 2000).

El riego precosecha debe suspenderse entre 1.5 a 2 meses antes de realizar la cosecha, ya que la humedad afecta negativamente el contenido de azúcares de la caña, pues ella determina que los azúcares formados por la planta sean empleados en otras funciones, especialmente en el crecimiento y que muy pocos sean acumulados. Una

buena maduración se logra disminuyendo el crecimiento y esto es posible reduciendo el contenido de humedad de la planta (Subirós, 2000).



Figura 1.14. Cosechadora de oruga

## 2. Remanga

Consiste en recoger los residuos de la cosecha acomodarlos a lo largo de los entresurcos, para incorporar material orgánico al suelo. Se realiza para facilitar el brote de los nuevos retoños y demás labores de cultivo, tanto en forma manual como mecánica.

Según lo observado en campo esta labor no sucede para todos los casos, ya que también se acostumbra quemar los residuos de la cosecha (Figura 1.15).



Figura 1.15. Quema de residuos después de la cosecha

### **3. Subsuelo-Escarificado**

Consiste en descompactar el suelo después de la cosecha, mejorando las propiedades físicas del mismo.

Se utilizan tres (3) cinceles por calle. El cincel central de forma parabólica se ubica a 75 cm del surco y trabaja a una profundidad entre 50-55 cm; los dos cinceles laterales (rectos) encargados de la labor del escarificado (Figura 1.16) están ubicados a 40 cm de las cepas de caña y su profundidad de labor óptima se encuentra entre 30 cm. A pesar de que dichas profundidades son las indicadas, estas no se logran ya que las profundidades de trabajo al menos en los 2 lotes para retoño estudiados las profundidades estuvieron entre 15 y 20 cm.

En el caso de que las labores de subsuelo y escarificado se realicen separados, para subsuelo, la época de realización, está comprendida entre los 4 y 6 días después de la cosecha y para el escarificado puede realizarse entre 2-3 semanas poscosecha antes del primer riego.



Figura 1.16. Escarificador

#### **4. Riego**

El riego se realiza después del paso del arado de cincel o escarificador, normalmente entre los 30 y 35 días después de cosecha. Además se aplican más riegos luego del abonado y control de malezas. Se pueden realizar hasta 5 riegos en total.

#### **5. Aplicación de fertilizante**

El objetivo es proporcionar e incorporar las cantidades adecuadas del fertilizante, para el completo desarrollo fisiológico de las plantaciones de la caña de azúcar. El fertilizante debe ser ubicado un mínimo de 5 cm y máximo de 15 cm bajo la superficie del suelo y no más de 40 cm del centro de la cepa (Figura 1.17).

Se establece realizar la aplicación entre 45- 60 después de cosecha. Siempre después del primer riego. Se considera fertilizar después del primer riego, dejando en suelo de textura media a gruesa una semana y en texturas finas dos semanas; en espera de un piso de suelo idónea para la labor de fertilización.



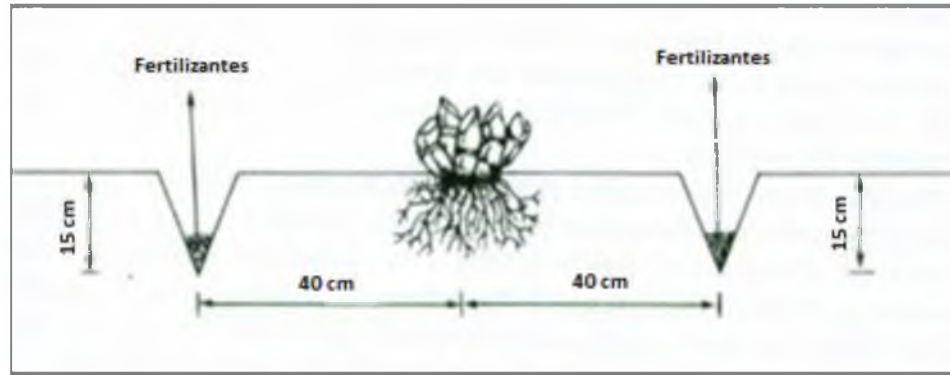


Figura 1.17. Aplicación de fertilizante

## 6. Cultivo- Aporque – Incorporación

Esta labor tiene como fin disminuir el tamaño de los terrones, facilitar la conducción y drenaje del agua, incorporar residuos y efectuar un control físico de malezas. El cultivo aporque debe hacerse entre la semana 4-8. El lomillo debe mantenerse entre 20-30 cm de altura en suelos arcillosos y 15-20 cm en suelos más livianos.

Se puede usar cultivadores de cinceles o discos (aporque e incorporadores) (Figura 1.18). Los discos o cinceles deben penetrar entre 10-15 cm del suelo y proporcionar una adecuada incorporación de los residuos.



Figura 1.18. Incorporador

## **7. Control químico de malezas**

Consiste en prevenir y controlar las malezas que compiten por luz, agua y nutrientes con el cultivo por debajo de los límites donde se produce una interferencia económicamente significativa. Se realizan mediante pulverizadores montados en tractores o bombas de espalda como aplicación manual con personal agrícola.

## 1.2 Problema

A pesar de que la compactación del suelo es multifactorial, existen algunos factores que son claves para el Ingenio Taboga, debido a la experiencia personal, que se pueden estudiar, como lo es la compactación debido a la cosechadora y la maquinaria utilizada en campo, el cual se debe al desconocimiento cuantitativo de los efectos de estas labores en la compactación en los diferentes tipos de suelo en los cuales se encuentra el cultivo de caña de azúcar. De igual manera sucede con la decisión de subsolar, ya que esta labor en estos momentos es un proceso más cualitativo que una decisión cuantitativa de los requerimientos de descompactación adecuada con el subsolador para una mejor producción de caña de azúcar.

## 1.3 Justificación

La compactación del suelo en el cultivo ha aumentado en importancia mundialmente debido al uso creciente de la maquinaria para la preparación de suelo, la siembra, control de plagas, cosecha y el transporte de la caña del campo al ingenio. (Forsythe, 2006)

Se han encontrado reportes internacionales en los cuales asocian una reducción del rendimiento de la producción de caña de azúcar hasta un 50%, debido a la compactación de suelos.

La carencia a nivel nacional en cuanto a estudios de compactación de suelos asociados al cultivo de la caña de azúcar ha sido la principal motivación para el estudio de este tema, ya que un mal manejo en las condiciones físicas del suelo, trae consigo problemas muy graves en cuanto al:

- Sistema radicular: al haber un aumento en la resistencia mecánica de penetración radicular y disminuir la disponibilidad de nutrientes y agua.

- Suelo: el aumento de la densidad aparente y la resistencia a la penetración del suelo conlleva una reducción de su porosidad y espacio de aire, además disminuye la conductividad hidráulica y la velocidad infiltración.
- Costo: el manejo del suelo debe realizarse de tal manera que los costos de preparación sean los menores posibles.

La evaluación del nivel de compactación mediante métodos empleados en procesos de compactación y rellenos de terraplenes, permite determinar con datos cuantitativos si es necesario una mejora en cuanto al manejo del suelo, en busca de lograr un uso eficiente y efectivo de la maquinaria utilizadas para los procesos de cultivo, trayendo consigo una disminución en los costos y un aumento en la producción de la caña de azúcar.

Debido a lo anterior es elemental realizar este tipo de estudio especialmente en uno de los Ingenios de mayor producción a nivel nacional. Adicionalmente este estudio puede servir como modelo para otras empresas o incluso agricultores enfocados en la producción de caña de azúcar.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo General:

Determinar los niveles de compactación de suelo asociado a tres labores del cultivo de la caña de azúcar, medido en cuatro parcelas representativas en el Ingenio Taboga.

### 1.4.2 Objetivos específicos:

- Revisar estudios nacionales e internacionales efectuados en cuanto a compactación de suelos e investigar los factores críticos que producen la compactación de suelos en el Ingenio de Taboga, asociado al cultivo de caña de azúcar.
- Aprovechar las técnicas de Mecánica de Suelos utilizadas en compactación para rellenos, para cuantificar los efectos de la maquinaria en la compactación de terrenos de cultivo de caña de azúcar en tres tipos de suelos críticos del Ingenio Taboga.
- Utilizar técnicas de mecánica de suelos para cuantificar los niveles de la descompactación que produce el subsolado en tres tipos de suelos críticos en el Ingenio Taboga.
- Establecer un procedimiento para que el personal técnico del Ingenio Taboga pueda seguir cuantificando los grados de compactación con el fin de definir con más precisión cuando y cuanto se requiere descompactar.

## 2 Marco Teórico

### 2.1 Mecánica de suelos

Según Sowers (1975) la compactación o reducción de la relación de vacíos se produce de varias maneras: reorientación de las partículas, fractura de los granos o de las ligaduras entre ellas seguida por reorientación y la flexión o distorsión de las partículas y sus capas adsorbidas.

La energía que se gasta en este proceso es suministrada por el esfuerzo de compactación de la máquina que se encuentra compactando el suelo. (Sowers, 1975).

En un suelo cohesivo, la compactación está acompañada, principalmente, por distorsión y reorientación, las cuales son resistidas por las fuerzas atractivas de la cohesión. A medida que la humedad del suelo aumenta la cohesión disminuye, la resistencia se hace menor y el esfuerzo de compactación aumenta. (Sowers, 1975).

Sin embargo, en un suelo cohesivo o no cohesivo, si la humedad es alta, la compactación y la reducción de la relación de vacíos de los suelos los lleva a la saturación, y el esfuerzo neutro que se crea impide que continúe disminuyendo la relación de vacíos. Por lo tanto, la saturación es el límite teórico de la compactación para una humedad dada. (Sowers, 1975).

Según Sowers (1975) la humedad y el peso de los sólidos por metro cúbico de suelo compactado, que se denomina peso específico seco (densidad seca) y se denota por  $\gamma_d$ , se determina de la siguiente manera:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad \text{(Ecuación 2.1)}$$

Donde

$W_s$  = peso específico seco (g/cm<sup>3</sup>)

$V$  = volumen total (cm<sup>3</sup>)

La densidad de un suelo bajo un esfuerzo constante de compactación aumenta progresivamente al aumentar el contenido de agua hasta llegar a un máximo, y luego disminuye con adiciones posteriores de agua. Este máximo se llama Humedad Óptima, para la cual la densidad (peso específico seco) es máxima, según el método de compactación que se haya usado, esto se logra observar en el siguiente gráfico (Figura 2.1). (Sowers, 1975).

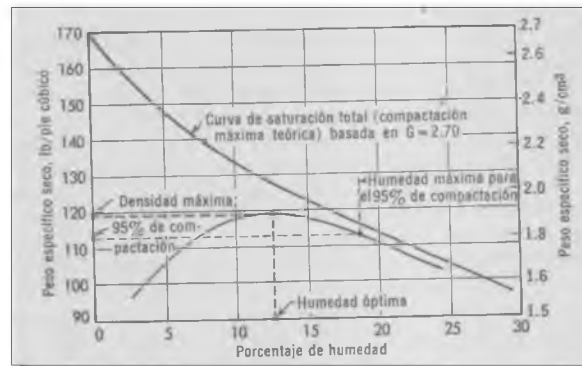


Figura 2.1 Curva de humedad- peso específico de un suelo cohesivo.

Fuente: Sowers, 1975

Cabe recalcar que usualmente los porcentajes de contenido de agua de capacidad de campo, recomendados por investigaciones agronómicas, son mayores que la humedad óptima requerida para compactar, por lo cual se debe tener cuidado a la hora de utilizar dichos contenidos de humedad a capacidad de campo, como base para trabajar en el campo.

En un suelo determinado, cuanto mayor es la densidad seca, menor es la relación de vacíos, cualquiera que sea la humedad. La curva de saturación representa los pesos específicos teóricos que se obtienen por una compactación, con el suelo saturado, con diferentes humedades. (Sowers, 1975).

Además existen una curva de humedad óptima y peso específico máximo, la cual representa que a mayor energía, mayor es el peso específico máximo y más baja la humedad óptima (Figura 2.2) (Sowers, 1975). Es decir, los valores de densidad máxima se desvían hacia el lado seco a medida que el esfuerzo de compactación es cada vez mayor. (Baver et al, 1972). Por lo tanto al aumentar la energía, aumenta la compactación aunque

no exista un aumento de humedad del suelo, contradiciendo lo especificado por Raghavan et al, 1990, al mencionar que la compactación adquiere su máxima intensidad solamente en la consistencia plástica o sea, cuando el suelo tiene un contenido de agua igual a la “capacidad de campo”.

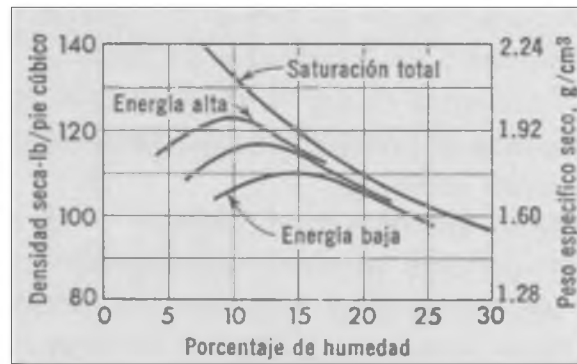


Figura 2.2. Curvas de humedad- peso específico para diferentes energías de compactación

Fuente: Sowers, 1975.

### 2.1.1 Prueba Proctor

La prueba consiste en compactar el suelo en cuestión de tres capas dentro de un molde de dimensiones y forma determinadas por medio de golpes de un pistón, que se deja caer libremente desde una altura especificada. Este método describe el procedimiento, para la determinación de la relación entre el contenido de humedad y la densidad de los suelos compactados.

Con este procedimiento de compactación Proctor se estudia la influencia que ejerce, en el proceso, el contenido inicial del agua en el suelo, encontrando que tal valor es de vital importancia en la compactación lograda, ya que a contenidos de humedad crecientes, a partir de valores bajos, se obtienen valores más altos de pesos específicos secos y, por lo tanto, mejores compactaciones del suelo, pero esta tendencia no se mantendrá indefinidamente, sino que al pasar la humedad de un cierto valor, los pesos específicos secos obtenidos disminuyen, resultando peores compactaciones. Por lo tanto para un suelo dado y usando el procedimiento descrito, existe una humedad inicial



llamada "óptima", que produce el máximo peso específico seco que puede lograrse con este procedimiento de compactación. Esto se observa en la curva de relación humedad vrs peso específico, realizada debido a los resultados de la prueba Proctor.

La prueba Proctor se ha utilizado anteriormente para realizar estudios agrícolas en campo, como es en el caso de Naseri et al (2007) el cual se realizó en el sur oeste de Iran en campos cultivados con caña de azúcar, y utilizó dicha Prueba para estudiar el potencial de compactabilidad del suelo, para el cual era necesario obtener la distribución del tamaño de partículas, la humedad óptima y el máximo peso específico.

También está el caso de Thomas et al (1996), el cual utilizó la Prueba Proctor para estudiar el efecto de la materia orgánica y labranza en la máxima compactabilidad de suelos con diferentes cultivos (maíz, alfalfa y césped).

#### *Grado de compactación*

Se define como Grado de Compactación (GC) de un suelo compactado a la relación, en porcentaje, entre la Densidad Seca alcanzada en obra y la Densidad Máxima Seca obtenida en laboratorio para el mismo suelo (Ensayo "Proctor" Estándar o Modificado)

$$GC [\%] = \frac{\text{Densidad Seca del suelo "in situ"}}{\text{Densidad Máxima Seca de laboratorio}} \times 100 \quad (2)$$

Entre los métodos para determinar la Densidad Seca en obra (es decir la compactación debido a las labores), son tres los más utilizados:

- Método de la arena.
- Método del volumenómetro (o de la membrana de goma).
- Densímetros nucleares.

El método utilizado en este estudio fue el del cono de arena, ya que en ese momento era el método más preciso (Anexo, Encabezado 8.2.13).

## 2.2 Mecánica del Tractor

### 2.2.1 Resistencia Mecánica del Suelo

El suelo tomado desde el punto de vista de la relación con las herramientas de labranza tiene un componente principal de análisis que es su Resistencia Mecánica, la cual condiciona que el suelo pueda ser laboreado con mayor o menor facilidad dependiendo de su resistencia a la deformación por compresión o deformación por resistencia al corte. (Ashburner et al, 1984).

Dicha resistencia está determinada por dos componentes de estado físico: Resistencia cohesiva y Resistencia Friccional. Los valores varían considerablemente y dependen del contenido de humedad, tamaño de partículas, tamaño y forma de agregados y el grado de consolidación. (Ashburner et al, 1984).

#### **2.2.1.1 Relaciones suelo/suelo y suelo/metal**

Los esfuerzos mecánicos a los que se halla sometido un suelo deformable están referidos a su resistencia a la compresión, resistencia a la tensión y resistencia al corte, siendo este último el más importante al hablar de labranza debido a que el suelo falla por esta resistencia, tanto porque el suelo a labrar debe ser fundamentalmente cortado de la manera más económica en términos energéticos por la herramienta, y deberá tener la suficiente resistencia como para que soporte la acción de tracción de neumático sin cortarse para que el tractor tenga piso. (Ashburner et al, 1984)

La falla del suelo debida a una herramienta de labranza depende de los parámetros de resistencia en la superficie de falla, que consiste de un interfaz suelo/suelo y otro de suelo/metal. (Ashburner et al, 1984)

##### 2.2.1.1.1 Relación suelo/suelo

Los parámetros que definen la relación suelo/suelo son fundamentalmente:

1. Cohesión
2. Fricción suelo/suelo (definido en término del ángulo de fricción interna  $\phi$ )

### 3. Densidad aparente

Al analizar los valores de esfuerzo máximo de corte de un suelo en función del esfuerzo normal al mismo, es decir lo que ocurre normalmente cuando uno introduce una herramienta en el suelo que tiene determinado peso o carga vertical y la arrastra a determinada velocidad se obtiene una relación que puede ser graficada e interpretada en función de una ecuación lineal, la cual fue determinada por Coulomb. (Ashburner et al, 1984)

Según Coulomb el esfuerzo máximo que puede soportar un suelo sin cortarse estará dado por la siguiente ecuación:

$$\tau_{max} = c + \sigma \tan \phi \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

Donde:

$\tau_{max}$  es el máximo esfuerzo de corte ( $\text{kg/cm}^2$ )

$c$  es la cohesión del suelo ( $\text{kg/cm}^2$ )

$\sigma$  es el esfuerzo normal en la superficie de falla ( $\text{kg/cm}^2$ )

$\phi$  es el ángulo de fricción interna suelo/suelo

#### 2.2.1.1.1.1 Cohesión, fricción y densidad aparente

La cohesión depende fundamentalmente de la humedad y la cantidad y tipo de arcilla, y desde el punto de vista de la resistencia mecánica del suelo son importantes sus componentes moleculares y superficiales (Ashburner et al, 1984):

Cohesión molecular: unión fuerte entre partículas de arcilla a bajo contenido de humedad. Referida a la resistencia de los terrones.

Cohesión superficial: con un mayor contenido de humedad existe un amarre entre los mismos terrones debido a la fuerza de tensión superficial ocasionada por el exceso de agua. Referida a la resistencia de grupos de terrones.

El ángulo de fricción interna es una función de la compactación de las partículas del suelo y los agregados. Este grado de compactación es una función de la densidad en masa

del suelo (Densidad aparente) y entonces existe una relación entre el ángulo de fricción interna y esa densidad. (Ashburner et al, 1984)

Algunos valores típicos de la cohesión y el ángulo de fricción interna se presentan en el Cuadro 2.1.

Cuadro 2.1 Valores típicos de la cohesión y el ángulo de fricción interna

Tipo de suelo	Tamaño típico de partículas (mm)	Estado	Ángulo de fricción	Cohesión (KN/m <sup>2</sup> )
Arena con partículas medianas	1.1	Compactado	38° - 40°	0
		Suelto	32° - 35°	0
Arena fina con materia orgánica	0.5 – 0.8	Compactado	25° - 30°	0
		Suelto	18° - 22°	0
Franco arenoso	0.02 – 0.2	Friable	24° - 28°	20 – 25
		Plástico	24° - 28°	10 - 15
Franco	0.01	Friable	22° - 26°	25 - 30
		Plástico	15° - 19°	15 - 20
Arcilloso	0.002	Friable	17° - 19°	40 - 60
		Plástico	10° - 14°	25 - 30

Fuente: Ashburner et al, 1984

#### 2.2.1.1.2 Relación suelo/metal

El esfuerzo de deslizamiento es sumamente importante al tratar la relación suelo/metal ya que la labranza se basa en el deslizamiento del suelo por superficies metálicas con formas más o menos agudas, planas o curvadas. (Ashburner et al, 1984)

Del mismo modo que se trató el tema suelo/suelo puede asociarse la ecuación de coulomb a la relación suelo/metal, con la excepción que lo que en suelo era la cohesión pasa a ser ahora adhesión y lo que era ángulo de rozamiento interno pasa a ser ahora ángulo de fricción, como lo muestra la siguiente ecuación:

$$\tau_{max}' = c_{\alpha} + \sigma \tan \delta \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

Donde:

$\tau_{max}$  es el máximo esfuerzo de deslizamiento (kg/cm<sup>2</sup>)

c es la adhesión del suelo (kg/cm<sup>2</sup>)

$\sigma$  es el esfuerzo normal en la superficie de falla (kg/cm<sup>2</sup>)

$\phi$  es el ángulo de fricción suelo/metal

La adhesión se define como la fuerza de atracción que se opone al deslizamiento del suelo sobre el metal y depende del contenido de arcilla del suelo y del contenido de humedad, alcanzando valores considerables en suelos arcillosos en estado plástico (valores desde 0.1 a 0.3 kg/cm<sup>2</sup>). (Ashburner et al, 1984)

La fricción refiere la magnitud del rozamiento suelo/metal y depende del grado de pulido de la herramienta. (Ashburner et al, 1984)

Cuadro 2.2 Valores típicos de la adhesión y el ángulo de fricción suelo/metal

Adhesión	Ángulo de fricción suelo/metal
Insignificantes en la mayoría de los casos	Superficie pulida 5°
Arcillas plásticas con alta humedad 10- 30 KN/m <sup>2</sup>	Superficie limpia 5° a 15°
	Superficie oxidada 15° a 25°

Fuente: Ashburner et al, 1984

## 2.2.2 Trabajo del tractor en superficie plana

### 2.2.2.1 Análisis de fuerzas

Las fuerzas que actúan sobre el tractor son numerosas y varían con el tiempo (Figura 2.3). Para simplificar el análisis se supondrá que se trabaja sobre una superficie plana y que las fuerzas de aceleración son cero cuando el tractor se desplaza a velocidad constante, además se supone la resistencia al rodamiento es cero y la fuerza variable resultante de la herramienta se considera que actúa inclinada al horizonte. (Ashburner et al, 1984)

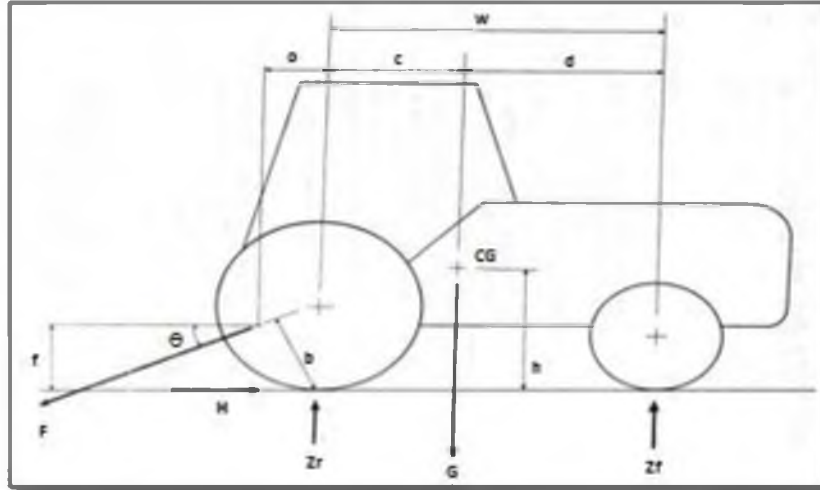


Figura 2.3 Análisis de fuerza en un tractor

Fuente: Ashburner et al, 1984

Según Ashburner & Sims, 1984, la situación de equilibrio se da por tres ecuaciones:

1. Equilibrio de las fuerzas horizontales:

$$H = F \cos\theta \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

Donde F es la fuerza producida por el implemento

2. Equilibrio de las fuerzas verticales:

$$Z = Z_f + Z_r = G + F \sin\theta \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

Donde G es el centro de gravedad del tractor

3. Los momentos alrededor del punto de contacto de la llanta trasera:

$$Z_f w = Gc - Fb \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

Donde:

C es la distancia entre el eje trasero y el centro de gravedad del tractor

b es la distancia entre el punto de acople y el área de contacto del neumático del eje trasero

La ecuación 2.5 es más simple al estimar las dimensiones del tractor como valores  $\lambda$ , que son fracciones de la distancia entre ejes  $w$ . Este sistema hace a las ecuaciones aplicables para un rango de tractores de la misma forma. (Ashburner et al, 1984)

Por lo tanto para las fuerzas verticales las ecuaciones serán las siguientes:

$$Z_f = G \lambda_c - F \lambda_b \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

Donde:

$Z_f$  es la fuerza producida en el eje delantero

$\lambda_c$  es la distancia del centro de gravedad al eje trasero entre la distancia entre ejes

$\lambda_b$  es la distancia entre el punto de acople y el área de contacto del neumático del eje trasero entre la distancia entre ejes

$$Z_r = G \lambda_d + F \lambda_b + F \text{sen } \theta \quad (\text{Ecuación 2.8})$$

Donde:

$Z_r$  es la fuerza producida en el eje trasero

$F \lambda_b$  es transferencia de peso

$F \text{sen } \theta$  es adición de peso

### **2.2.2.2 Transferencia y adición de peso**

Se producen dos efectos importantes de la resultante  $F$  de la fuerza inclinada de la herramienta sobre la reacción  $Z_r$  de la rueda trasera. (Figura 2.3). (Ashburner et al, 1984)

1. La transferencia de peso de  $F \lambda_b$  desde el eje delantero hasta el posterior.
2. La adición de peso de  $F \text{sen } \theta$  a la reacción del eje posterior, lo cual tiene valor positivo en el caso de que  $F$  este inclinada ( $\theta > 0$ ).

La transferencia y adición de peso son efectos importantes en un tractor con capacidad para desarrollar alta tracción. Al aumentar la reacción vertical sobre las llantas de mando se alcanza mejor tracción, lo que significa que para un tractor convencional con mando en las llantas traseras las fuerzas de la herramienta ayuda a aumentar dicha

capacidad de tracción. Además se debe de tomar en cuenta que al incrementar la inclinación de la fuerza resultante de la herramienta (aumentar  $\theta$ ), se debe aumentar la adición de peso (Figura 2.4) (Ashburner et al, 1984).

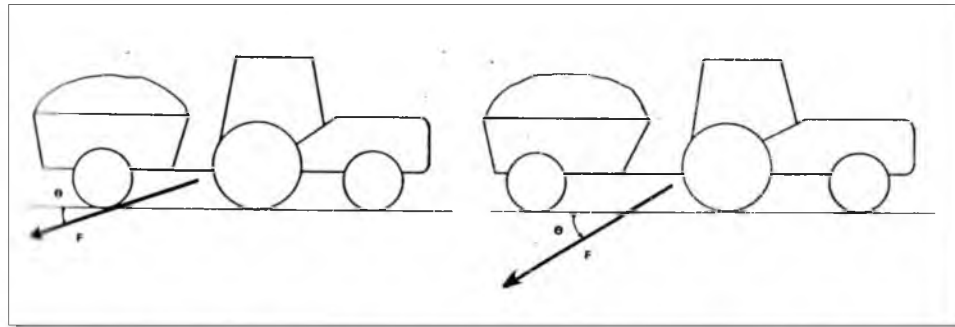


Figura 2.4 Transferencia y adición de peso de una herramienta

Fuente: Ashburner et al, 1984



## 3 Capítulo Metodología

### 3.1 Descripción del área de trabajo

#### 3.1.1 Ubicación

El estudio se desarrolló en el Ingenio Taboga ubicado en el distrito Bebedero, cantón Cañas, provincia de Guanacaste, en la Finca Norte y la Finca Sur (Figura 3.1 y Figura 3.2). En la Finca Norte se realizó propiamente en el sector de Hortigal y San Juan y en la Finca Sur propiamente en el sector de San Jacinto y Liberianos (Figura 3.3).



Figura 3.1. Ubicación del Ingenio Taboga en el mapa de Costa Rica



Figura 3.2. Ubicación de Finca Norte y Finca Sur del Ingenio Taboga

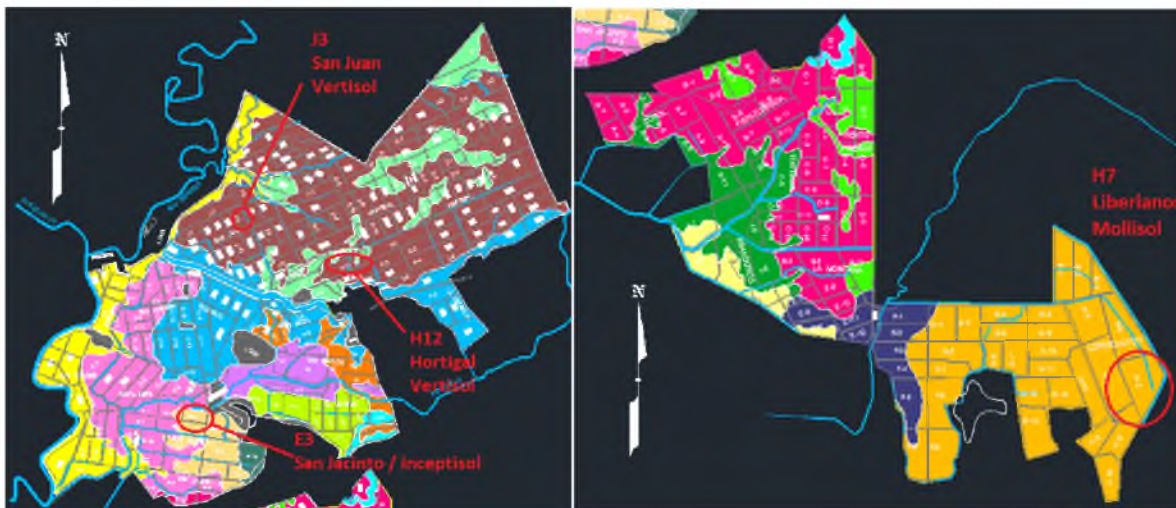


Figura 3.3. Ubicación de lotes del Ingenio Taboga utilizados para el estudio

### 3.1.2 Clima

El clima predominante en el área de estudio, de acuerdo con el Mapa Climatológico de Costa Rica (Hernández G. , 2005), es Tropical lluvioso de sabana, representando un régimen húmedo-seco tropical con cinco meses seco, cinco meses húmedo y dos meses muy húmedo. La temperatura promedio diario es de 27°C, la máxima de 32°C y la mínima de 21°C. La precipitación y viento mensual se presenta en el Cuadro 3.1

Cuadro 3.1 Precipitación y viento promedio mensual de Cañas, Guanacaste

Mes	Precipitación mensual (mm)	Viento mensual (km/h)
Enero	25	18
Febrero	25	19
Marzo	25	19
Abril	46	16
Mayo	205	10
Junio	259	8
Julio	155	10
Agosto	233	9
Setiembre	379	8
Octubre	358	8
Noviembre	136	13
Diciembre	34	13

Fuente: Hernández, 2005

Específicamente en el Ingenio Taboga, según su propia estación meteorológica la precipitación promedio anual es de 1618 mm. La temperatura promedio anual es de 28°C. En la época seca, los vientos predominantes son alisios, con una dirección Noreste-Suroeste, alcanzando ráfagas de hasta 70 km/h, y en la época de lluvias (mayo a noviembre) los vientos dominantes son los monsonicos con una dirección Suroeste-Noreste, con velocidades promedio de 4 km/h. La humedad relativa máxima en la época seca varía entre 60 y 70%, mientras que en la época lluviosa varía entre 80 y 90%.

### 3.1.3 Suelo

Los suelos predominantes en las áreas del Ingenio Taboga son los Inceptisoles, Molisoles y Vertisoles, siendo estos mismos los utilizados para el estudio.

Los inceptisoles abarcan alrededor de un 39% del territorio nacional, comúnmente se encuentran en zonas poco onduladas y planas, siendo estos los suelos de mayor potencial agrícola en Costa Rica. Su origen proviene del efecto de meteorización que sufren los sedimentos aluviales, coluviales y coluvioaluviales depositados cuando permanecen sin recibir nuevos aportes por un cierto período de tiempo. (Henríquez et al, 2012)

En estos suelos no existe algún material predominante, ya que según su origen las características químicas y mineralógicas cambian. En general lo que se encuentra en ellos

son mezclas de varios tipos de arcillas y minerales primarios. Otra característica es un epipedón pobre en materia orgánica (Henríquez et al, 2012)

Los vertisoles tienen una extensión muy limitada a nivel nacional, abarcando no más de 2%. Se encuentran en las zonas planas y depresionales del Pacífico seco de Costa Rica, en la cual la duración de la estación seca es de 4 a 6 meses. (Henríquez et al, 2012)

Se originan en zonas depresionales que impiden el buen drenaje, acumulando los materiales ricos en Si, Ca y Mg. Esto origina la formación de arcillas 2:1 del tipo montmorillonítico, siendo arcillas de tipo expandible con una gran superficie específica, características de alta cohesión, adhesividad, plasticidad y capacidad para retener agua. Debido a sus reacciones de contracción y expansión, estos suelos afectan negativamente las labores agrícolas. (Henríquez et al, 2012)

Los vertisoles son habitualmente de color oscuro y de menos de un metro de profundidad. Al inicio de las lluvias cuando los suelos están agrietados, el movimiento vertical del agua ocurre a través de las grietas, permitiendo la expansión de las arcillas del subsuelo y sellando el sistema, resultando así suelos prácticamente impermeables, provocando inundaciones. Y en el otro extremo cuando el suelo se seca, se forman bloques masivos que se fracturan en grandes grietas que afectan obras de infraestructura como canales de riego. Se dificulta la mecanización ya que depende de los límites de consistencia y del contenido de humedad. (Henríquez et al, 2012)

Los molisoles abarcan solamente un 1.4% del territorio nacional y son básicamente suelos negros o pardos que se han desarrollado a partir de sedimentos minerales en climas templado húmedo a semiárido (Henríquez et al, 2012). Los molisoles son algunos de los suelos agrícolas más importantes y productivos del mundo y son ampliamente utilizados para este propósito. (University of Idaho, 2012).

La incorporación sistemática de los residuos vegetales y su mezcla con la parte mineral genera en el transcurso del tiempo un proceso de oscurecimiento del suelo por la incorporación de la materia orgánica que se refleja más profundamente en la parte superficial, la que se denomina epipedón mólico. Otras propiedades que caracterizan a los

Molisoles son: la estructura granular moderada y fuerte que facilita el movimiento del agua y aire; la dominancia del catión calcio en el complejo de intercambio catiónico, que favorece la fluctuación de los coloides; la dominancia de arcillas, moderada a alta capacidad de intercambio y la elevada saturación con bases. (USDA, 2010)

Las características de los suelos específicos de los lotes en estudio se presentan en los siguientes cuadros.

Cuadro 3.2. Características de los suelos según USDA\* de los lotes en estudio

Características de Suelos								
Parcela	Clasificación Taxonómica			Clasificación del suelo				M.O* a 15 cm prof. (%)
	Orden	Gran Grupo	Suborden	Clase Textural (USDA)				
				% Arcilla	% Arena	% Limo	Clasificación	
1	Vertisol	Usterts	Typic Haplustert	62.6	19.74	17.66	Arcilla	2.29
2	Inceptisol	Ustept	Fluventic Haplustept	23.05	57.57	19.38	Franco Arcillo Arenoso	4.37
3	Vertisol	Usterts	Typic Haplustert	56.36	20.50	23.15	Arcilla	2.44
4	Mollisol	Ustoll	Fluventic Haplustoll	23.93	44.59	31.48	Franco	2.30

\* USDA: US Department of Agriculture; M.O: Materia Orgánica

Cuadro 3.3. Clasificación del suelo según SUCS\* de los lotes en estudio

Parcela	Material que pasa la malla No.200 (%)	Granulometría (SUCS)	Gravedad específica
1	98.36	CH	2.65
2	96.99	CL	2.59
3	97.53	CH	2.67
4	91.61	ML	2.65

\*SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

Cuadro 3.4. Límites de consistencia de los suelos de los lotes en estudio

Parcela	C.C* (-0.33 Mpa X 10 <sup>-1</sup> )	P.M.P* (-15 Mpa X 10 <sup>-1</sup> )	L.P.S*	L.P.I*	IP
1	34.44	25.28	94.7	28.4	66.3
2	33.54	23.34	46.0	29.5	16.5
4	28.3	18.95	40.2	30.4	9.7
3	33.35	24.76	83.9	26.7	57.2

\*C.C: Capacidad de campo; P.M.P: Punto de marchitez permanente; L.P.S: Límite plástico superior (Límite Líquido); L.P.I: Límite plástico inferior (Límite plástico); IP: Índice de plasticidad

Cuadro 3.5. Máxima carga mecánica que el suelo puede soportar previo al colapso

Parcela	Suelo	Precompactación (KPa)	
		15 cm Prof.	40 cm Prof.
1	Vertisol	50	51
2	Inceptisol	48	50
4	Mollisol	32	58

En el caso de carga mecánica máxima y los valores de cohesión del suelo, ángulo de fricción interna y máximo esfuerzo de corte no se obtuvieron para la parcela 3, ya que se da el supuesto de que por ser un Vertisol se comporta de la misma manera que la parcela 1 (Cuadro 3.5 y Cuadro 3.6). Además es importante recalcar que las muestras para obtener tales datos se recolectaron al final de todas las labores a realizar en el campo, lo cual fue a finales de mayo del 2011. Para obtener estos datos se utilizó el ensayo de corte con veleta (Ver referencia 3.2.5.3.1)

Cuadro 3.6. Cohesión del suelo ( $C'$ ), ángulo de fricción interna suelo/suelo ( $\phi'$ ) y máximo esfuerzo de corte ( $\tau_{max}$ ).

	Suelo	$C'$ (Mpa x 10 <sup>-1</sup> )		$\phi'$ (Grados)		$\tau_{max}$ (Mpa x 10 <sup>-1</sup> )	
		15 cm Prof.	40 cm Prof.	15 cm Prof.	40 cm Prof.	15 cm Prof.	40 cm Prof.
1	Vertisol	0.16	0.14	71.6	70.4	0.49	0.52
2	Inceptisol	0.22	0.2	73.6	75.6	0.74	1.29
4	Mollisol	0.13	0.12	70.9	73.8	0.73	1.02

## 3.2 Metodología

Para este trabajo se siguió la metodología presentada a continuación:

### 3.2.1 Selección de las parcelas

Las parcelas en las cuales se realizó el muestreo se seleccionaron en función de:

- La textura del suelo:* Se eligieron dos parcelas con suelo arcilloso y una parcela con suelo franco y otra parcela con suelo franco arcillo arenoso. La

información en cuanto a textura de suelo fue obtenida del personal del Ingenio de Taboga.

- b. *Según la cantidad de cosechas*: Se eligieron dos parcelas con cero cosechas, es decir para preparación de suelos y siembra de cultivo, y dos parcelas con tres cosechas (Se realiza una cosecha por año).

Tal y como se muestra en la Figura 3.1, cada parcela cuenta con un área diferente, con un promedio de 10 Ha.

Se utilizan las parcelas 1 y 2 para las mediciones de compactación y resistencia a la penetración producidas por las labores de preparación de suelos y siembra de cultivo y para el caso de la labor de cosecha se utilizan las parcelas 3 y 4. De igual manera se utilizan las cuatro parcelas para la medición de descompactación producida por la labor de subsolado.

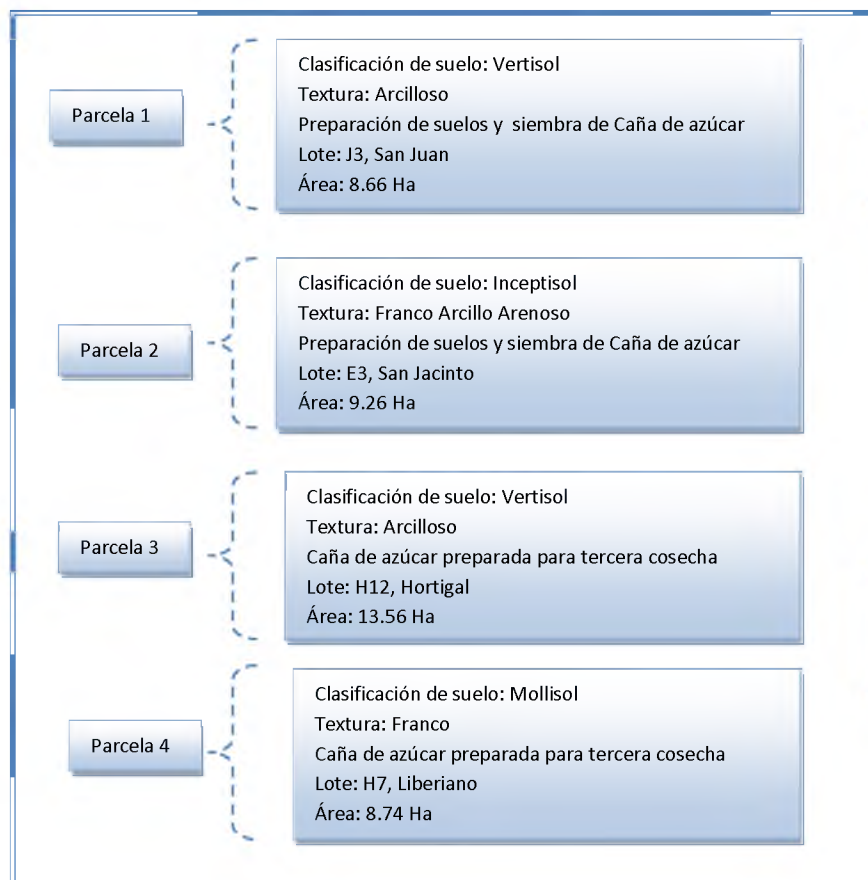


Figura 3.1 Selección de parcelas

### 3.2.2 Obtención de muestras para análisis de clasificación de suelos

Es necesario realizar un análisis de clasificación de suelos para verificar la información dada por el Ingenio Taboga y además conocer realmente con qué tipo de suelo se está trabajando.

Para esto se realizaron diferentes análisis en dos laboratorios con diferentes enfoques, uno con el enfoque de Mecánica de Suelos y otro con el enfoque agronómico. Ya que uno de los objetivos del estudio es aprovechar las técnicas de Mecánica de Suelos utilizadas en compactación para rellenos, para cuantificar los efectos de la maquinaria en la compactación de terrenos de cultivo de caña de azúcar.

La obtención de muestras para todos los análisis mostrados a continuación se tomaron de 0 a 30 cm de profundidad en varios puntos aleatorios de cada parcela hasta llenar un saco (aproximadamente 25 kg). Con las muestras obtenidas de campo se realiza el cuarteo (Anexo 8.2.1), con el objetivo de homogeneizar la muestra y obtener una muestra representativa.

- a. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (Lanamme UCR): En específico en el Laboratorio de Geotecnia. Los análisis realizados se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 3.7. Análisis de clasificación de suelos realizados en el Lanamme UCR

Análisis	Norma	Objetivo	Procedimiento
<b>Gravedad Específica de un Suelo</b>	ASTM D-854	Conocer la cantidad de vacíos que existe en el suelo	Anexo 8.2.2
<b>Límites de Atterberg</b>	ASTM D-4318	Determinar los límites de consistencia de un suelo y el Índice de Plasticidad	Anexo 8.2.3
<b>Análisis Granulométrico</b>	ASTM D-422	Determinar cuantitativamente la distribución de tamaños de partículas de un suelo	Anexo 8.2.4



Al utilizar los resultados de cada análisis se logra obtener la clasificación unificada de suelos (SUCS), utilizando la Tabla de Criterios de SUCS (Anexo 8.2.6).

- b. Laboratorio de Suelos de la Universidad de Costa Rica en la sede de Guanacaste: El enfoque de este laboratorio es agronómico. Los análisis realizados se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 3.8. Análisis realizados en el Laboratorio de Suelos de la Universidad de Costa Rica en la sede de Guanacaste

Análisis	Objetivo	Procedimiento
<b>Análisis textural</b>	Mediante el método de Bouyoucos se obtuvo la textura de los suelos	Anexo 8.2.7
<b>Materia Orgánica</b>	Mediante el método de oxidación se obtuvo el % de M.O en los primeros 15 cm de suelo	Anexo 8.2.8
<b>Retención de Humedad del suelo</b>	Mediante el cual se obtienen las curvas de humedad para cada suelo en específico	Anexo 8.2.9
<b>Análisis de esfuerzo máximo de corte</b>	Mediante el cual se obtiene la cohesividad del suelo, el ángulo de fricción interna, el esfuerzo normal y el esfuerzo máximo de corte	Anexo 8.2.10
<b>Análisis de Consolidación</b>	Mediante el cual se obtienen los puntos de precompactación del suelo antes de que colapse.	Anexo 8.2.11

### 3.2.3 Obtención de muestras para análisis de Compactación de Suelos y Resistencia a la Penetración

Para obtener las muestras y así determinar los niveles de compactación y la resistencia a la penetración se varían los diferentes tratamientos:

- Variable 1: se utilizan tres tipos de textura de suelo:
  - a. Arcilloso
  - b. Franco

- c. Franco arcillo arenoso
  
- Variable 2: Según la cantidad de cosechas:
  - a. Parcela con siembra de cultivo o cero cosechas
  - b. Parcela con una cosecha anual en los últimos tres años.
  
- Variable 3: Según la operación a realizar
  - a. El paso de la cosechadora
  - b. El paso del subsolador o arado de cincel
  - c. El paso de la maquinaria utilizada para abonar y cultivar
  - d. Preparación de suelos y siembra de cultivo

Por lo tanto las variables 1 y 2 son fijas para el caso de cada parcela y la variable 3, es la que define el momento de toma de muestra, dependiendo de la operación que se realice. (Figura 3.2)

El momento de la toma de muestras depende de la variable 3, por lo tanto para el caso:

- a. El paso de la cosechadora: se debe muestrear antes y después del paso de la cosechadora.
- b. El paso del subsolador o arado de cincel: Se muestrea después del paso del subsolador o arado de cincel.
- c. El paso de la maquinaria utilizada para abonar y cultivar: Se muestrea después del paso de la maquinaria utilizada para abonar y cultivar
- d. Preparación para siembra de cultivo: Se muestrea después de toda la preparación para la siembra de la caña de azúcar.

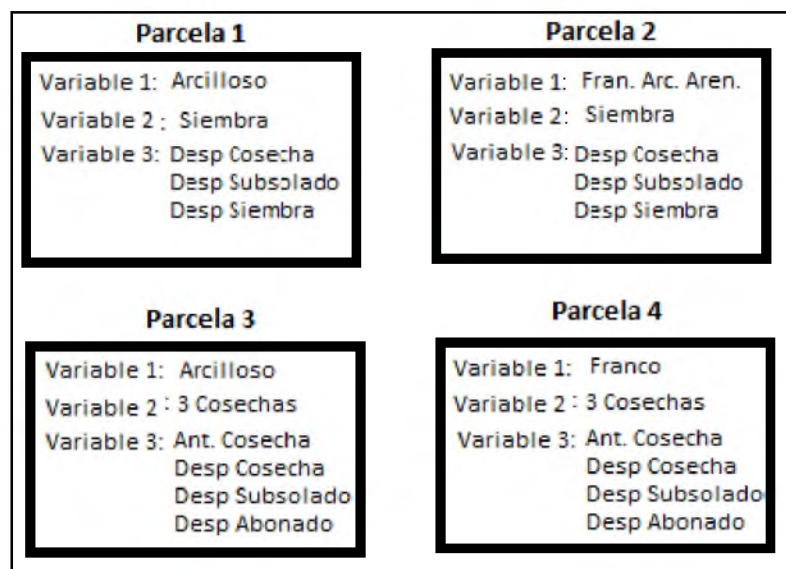


Figura 3.2. Variables de los tratamientos para la obtención de muestras para el análisis de Compactación de Suelos y Resistencia a la Penetración

El diseño experimental es completamente aleatorio, en el cual se evalúan varias variables a la vez. Al tratarse de tres variables, se realizan cuatro repeticiones por parcela para cada toma de muestra.

De las muestras se obtienen cuatro datos principales con los siguientes equipos y métodos, mostrados en el Cuadro 3.9

Cuadro 3.9 Equipo o método utilizado para la recolección de muestras y datos experimentales

Dato	Equipo o Método	Norma	Prestado por	Procedimiento
Densidad seca máxima y Humedad óptima de compactación	Prueba Proctor Estándar	ASTM D-698	Lanamme UCR	Anexo 8.2.12
Densidad "in situ"	Método del Cono de arena	ASTM D-1556	Lanamme UCR	Anexo 8.2.13
Resistencia a la penetración	Penetrómetro de mano Eijkelkamp		Escuela de Ingeniería Agrícola	Anexo 8.2.14
Humedad gravimétrica	Método de secado al horno	ASTM D-2216	Lanamme UCR	Anexo 8.2.15

A continuación se presenta en el Cuadro 3.10, las fechas de las tomas de muestra para cada parcela.

Cuadro 3.10. Fechas de toma de muestras en cada parcela

Parcela	Momento	Fecha de toma de muestra
1	Después de Cosecha	04/03/2011
	Después de Subsulado	05/04/2011
	Después de Siembra	28/05/2011
2	Después de Cosecha	01/03/2011
	Después de Subsulado	14/03/2011
	Después de Siembra	28/05/2011
3	Antes de Cosecha	16/02/2011
	Después de Cosecha	09/03/2011
	Después de Subsulado y Riego	06/04/2011
	Después de Abonado	10/05/2011
4	Antes de Cosecha	25/02/2011
	Después de Cosecha	26/03/2011
	Después de Subsulado y Riego	08/04/2011
	Después de Abonado	08/05/2011

### **3.2.3.1 Muestras para el análisis de compactación de suelos**

Para determinar el grado de compactación (GC) del suelo es necesario obtener:

- La densidad seca máxima
- Humedad óptima de compactación

- La densidad seca “in situ”

La Prueba Proctor Estándar permite determinar el peso volumétrico húmedo máximo al cual puede llegar el material con un valor de humedad óptima, por lo cual por medio de esta prueba se logra obtener la densidad seca máxima y la humedad óptima de compactación de laboratorio. Esta prueba se ejecuta por parcela, por lo cual en total son cuatro Pruebas Proctor Estándar (Procedimiento en Anexo 8.2.12).

Para la obtención de la densidad seca del suelo “in situ”, el Lanamme UCR sugirió dos métodos:

1. El método del cono de arena, según la norma ASTM D-1556 (Anexo 8.2.13).
2. El método del balón, según la norma ASTM D-2167.

Se eligió el método del cono de arena por facilidad del uso del equipo, ya que ambos métodos tienen el mismo grado de precisión (Valerio, 2011).

El método del cono de arena mide de forma indirecta el volumen del suelo excavado y consiste en rellenar el orificio con arena calibrada, por lo cual el volumen de arena utilizado es proporcional al volumen del hueco (Figura 3.3). Mediante este procedimiento se determina la densidad in situ de un suelo. La profundidad de la toma de muestra se efectúa entre los 15 a 30 cm en el entresurco, y se hacen cuatro repeticiones por parcela, de manera aleatoria. Todos los instrumentos fueron prestados por el Lanamme UCR y se utilizó principalmente el cono y placa A



Figura 3.3 Método del cono de arena

### 3.2.3.2 Muestras para el análisis de Resistencia a la Penetración

Se utiliza el penetrómetro de mano eijkelkamp para obtener la resistencia a la penetración del suelo, ya que es uno de los tres índices más conocidos para medir el grado de compactación junto con la densidad aparente y el espacio aéreo (Henríquez & Cabalceta, Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola, 1999).

Para la toma de datos con el penetrómetro se realizaron cuatro calicatas de 2 m por 2 m con 1 m de profundidad por parcela, de manera aleatoria, ya que es necesario realizar un corte vertical del entresurco y el surco. (Figura 3.4).



Figura 3.4 Toma de datos de Resistencia a la penetración utilizando el Penetrómetro

Los datos se toman en el entresurco y el surco (Figura 3.5). La profundidad de la toma de datos con el penetrómetro se realizaron a 15 cm, 30 cm y 60 cm (Figura 3.6). Ya que los primeros 30 cm son los críticos, debido al crecimiento de las raíces. Además se decidió introducir el penetrómetro a una profundidad de 30 cm para todas las repeticiones como una manera de homogenización de datos.

Por cada toma de datos en cada profundidad se realizan siete repeticiones, para que el dato sea representativo.

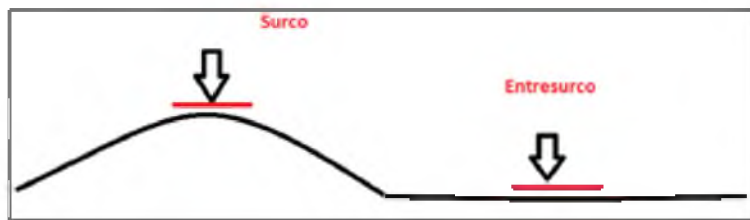


Figura 3.5 Datos en el entresurco y en el surco.

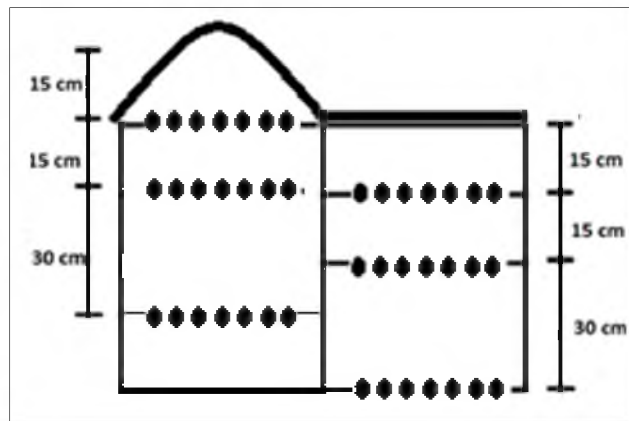


Figura 3.6 Profundidad de toma de datos con penetrómetro

Debido a que la resistencia a la penetración se encuentra relacionada con la humedad del suelo, se toman muestras de humedad a cada profundidad y en el entresurco y el surco (Figura 3.7). Las muestras se clasifican de la siguiente manera:

a.b.c.d.e

a: Textura:

1. Arcilloso
2. Franco
3. Franco arcillo arenoso

b: Cantidad de cosechas

1. sin cosechas
2. con 3 cosechas

c: Labor

1. Cosechadora
2. Subsulado
3. Abonado y cultivado
4. Siembra

d: Profundidad

1. 15 cm
2. 30 cm
3. 60 cm

e: Ubicación

1. Entresurco
2. Surco

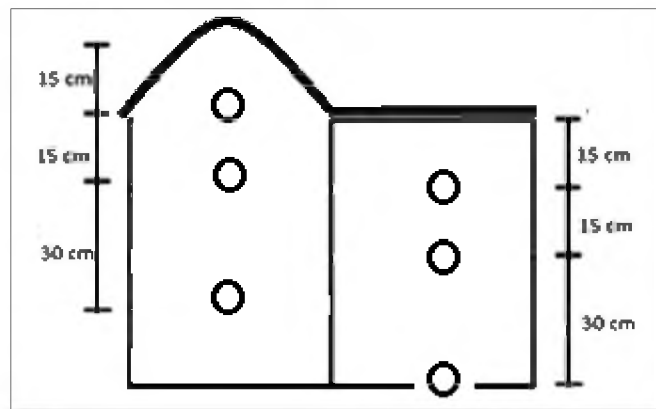


Figura 3.7 Toma de muestras de humedad



Por lo tanto se obtiene un dato de resistencia a la penetración relacionado con la humedad en la que se encuentra el suelo en ese preciso momento. Debido a que la resistencia a la penetración está relacionada con el porcentaje de humedad del suelo y lo recomendable es obtener los datos a capacidad de campo para poder comparar entre datos, algo difícil de realizar en campo, se utilizó el programa excel para realizar regresiones lineales y analizar si existe alguna relación entre los datos de resistencia a la penetración y el porcentaje del contenido humedad para cada parcela en específico, en cada momento y separando los valores que se encuentran en el entresurco y el surco.

Debido a que en varios casos las regresiones lineales no presentaban alguna correlación se decidió eliminar todos los datos que daban como resultado  $0 \text{ N/cm}^2$ , ya que al realizar esto se lograban obtener mejores correlaciones y se realizó en todos los casos para mantener el análisis consistente, esto se logra observar en el anexo (encabezado 8.3.2). Además se tomaron como datos prioritarios los cuales se encontraban a capacidad de campo o a  $\pm 1\%$  de la capacidad de campo para cada tipo de suelo. En el Cuadro 8.2, Cuadro 8.3, Cuadro 8.4 y Cuadro 8.5 se logra observar los datos seleccionados para la Parcela 1, Parcela 2, Parcela 3 y Parcela 4 respectivamente.

#### 3.2.4 Curvas de retención de humedad

Debido a que las curvas de retención de humedad en el suelo, son una herramienta muy útil para cuantificar el estado energético del agua con relación a su contenido gravimétrico en el suelo, y que además ayudan a estimar el balance hídrico del suelo en cualquier condición dada (Henríquez et al, 1999), se procede a cuantificarlas. Asimismo al obtener la curva de retención de humedad se logra ubicar la humedad óptima de compactación (obtenida con la prueba Proctor Estándar) para ese suelo en específico.

Cada suelo tiene una curva de retención de humedad característica, debido a que influyen las propiedades físicas del mismo (textura, estructura, materia orgánica, espacio poroso, etc) (Henríquez et al, 1999).

Para expresar la retención del agua en el suelo se utilizan unidades de presión y succión, porque parte del agua que entra al suelo es retenida por esta y las plantas deben ejercer cierta fuerza por unidad de área para absorberla. Esta fuerza por unidad de área con que el agua de suelo es retenida se denomina tensión o succión, y la unidad que tradicionalmente se utiliza para expresar la succión es el bar, aunque actualmente se expresa en pascales según el SI (Sistema Internacional de Unidades) (Henríquez et al, 1999).

A nivel de laboratorio, el método se basa en que la succión en el suelo puede ser “inducida” al someter la muestra a diferencias de presión, la cual hace salir el agua de las muestras hasta que estas queden en equilibrio con la presión aplicada. Las presiones aplicadas son similares a valores de succión que existen en el suelo y tienen significado fisiológico (Henríquez et al, 1999).

En el laboratorio las muestras son colocadas sobre platos de cerámica que permiten solo el paso del agua y no del aire. Los platos son colocados dentro de ollas selladas en donde aplican presiones requeridas (Figura 3.8).

Luego de que se logra el equilibrio en la muestra, al dar cero la resta de la presión aplicada a la succión del suelo, se procede a determinar la humedad gravimétrica correspondiente a la presión aplicada y se grafican ambas variables (Anexo Figura 8.80).

Es importante destacar que las muestras utilizadas para obtener dicha curva se tomaron en condiciones de suelo compactado, ya que se obtuvieron después del paso de toda la maquinaria en cada parcela.



Figura 3.8 Olla de presión

### 3.2.5 Especificaciones de maquinaria

De cada tractor utilizado en las cuatro parcelas de estudio se obtuvo lo siguiente (Anexo Cuadro 8.11):

- Potencia
- Lastreado (Peso adicional en la parte delantera del tractor, para evitar levantamiento con las llantas traseras, debido a la transferencia de peso al adicionar un implemento).
- Capacidad de tanque de combustible
- Distancia entre ejes
- Especificaciones de neumáticos: Área de contacto de llantas delanteras, Área de contacto de llantas traseras, perfil, dimensiones, presión, carga de agua.
- Peso adicional en llantas traseras de los tractores (Ver Anexo Cuadro 8.12)

En cuanto a los implementos se tomaron las mediciones necesarias para cada caso, ya que varios han sido modificados (Anexo Cuadro 8.13 y Cuadro 8.23). Las mediciones se realizaron con una cinta métrica. Además al realizar los cálculos de cargas se toman en cuenta las capacidades de cada implemento para cargar ya sea caña de azúcar o abono (Ver anexo Cuadro 8.24).

### 3.2.5.1 *Peso de maquinaria*

Al haber terminado las labores en todas las parcelas estudiadas, se procede a pesar toda la maquinaria que se utilizó en cada parcela. Cada maquinaria, ya sea tractor o implemento tiene su código, puesto por la misma empresa tal y como se muestra en el Cuadro 3.11. Debido a que es complicado pesar cada tractor en específico, se pesa por modelo del tractor junto con todos los implementos que se utilizaron con ese modelo definido.

Cuadro 3.11 Maquinaria utilizada en las cuatro parcelas de estudio

<b>Código Tractor</b>	<b>Tractor</b>	<b>Código Implemento</b>	<b>Implemento</b>
503	CASE International MX 135	E-16	Escarificador
		S-58	Subsolador
A-50	NH TM7010	A-23	Abonadora
A-51	NH TM7010	C-32	Conformador
A-52	NH TM7010	A-16	Abonadora
A-56	NH TM7010	S	Carreta semilla
A-57	NH TM7010	S	Carreta semilla
A-58	NH TM7010	I-01	Incorporador
A-59	NH TM7010	A-23	Abonadora
		A-19	Abonadora
A-60	NH TM7010	A-23	Abonadora
		A-25	Abonadora
A-62	NH TM7010	A-20	Abonadora
A-63	NH TM7010	A-23	Abonadora
		A-25	Abonadora
A-67	NH TM7010	T-42	Tapador
		S	Carreta semilla
A-75	NH TG245	A-36	Arado cincel
		R-37	Rufa
		R-09	Rastra
A-76	NH TM7020	R-14	Rastra
		S	Carreta semilla
A-77	NH TM7040	S-78	Surcador recto
		S-78	Surcador recto
A-82	NH TG210	R-09	Rastra
		R-39	Inyectora
		R-37	Rufa

A-88	NH TS6020	H-26	Equipo herbicida
A-91	NH TM7040	R-09	Rastra
A-92	NH TM7010	H-26	Equipo herbicida
		E-05	Escardillo
		I-02	Incorporador
A-93	NH TG210	R-39	Inyectora
		R-09	Rastra
A-94	NH TM7020	A-23	Abonadora
	NH TM7010	H	Carretas Autovolteo

Se pesa en la romana camionera del Ingenio Taboga de la siguiente manera:

1. Peso Total del Tractor
2. Peso del eje delantero del tractor
3. Peso del eje trasero del tractor
4. Peso Total del Implemento
5. Peso del eje delantero del tractor con implemento
6. Peso del eje trasero del tractor con implemento

Se realiza el peso por eje debido a la transferencia de peso desde el eje delantero al trasero y la adición de peso de la fuerza inclinada del implemento al eje trasero.

### **3.2.5.2 Carga sobre el suelo debido a la maquinaria**

Para el cálculo de la carga se utiliza el peso del eje trasero del tractor más el implemento entre el área de contacto de las llantas del eje trasero del tractor. Se realiza de esta manera ya que las cargas son mayores en el eje trasero del tractor que las cargas totales del tractor más el implemento. Solamente en el caso de las carretas autovolteo y de semilla la mayor carga se da en dichas carretas, por lo que se toma esa carga en vez del eje trasero del tractor.

### **3.2.5.3 Resistencia mecánica**

Dicha resistencia está determinada por dos componentes de estado físico: Resistencia cohesiva (suelo/suelo) y Resistencia Friccional (suelo/metal).

### 3.2.5.3.1 Relación suelo/suelo

Para calcular el esfuerzo máximo de corte se utilizó el ensayo de corte con veleta o mejor conocido como cuchilla de corte de mesa, dicho aparato tiene la ventaja de poder medir la resistencia cortante del suelo "in situ" (Forsythe W. , 1985). Consiste básicamente en colocar una veleta de cuatro hojas dentro del suelo inalterado, y girarla manualmente desde la superficie para determinar la fuerza de torsión necesaria para lograr que una superficie cilíndrica sea cortada por la veleta (Figura 3.4 y Figura 3.5); con esta fuerza de corte se halla entonces el esfuerzo máximo de corte de dicha superficie. Es de importancia básica que la fricción de la varilla de la veleta y la del aparato sean tenidas en cuenta porque de otra manera, la fricción sería inadecuadamente registrada como resistencia del suelo. El equipo utilizado es de marca Eijkelkamp, modelo 8.45 Y se utilizan muestras no alteradas del campo.

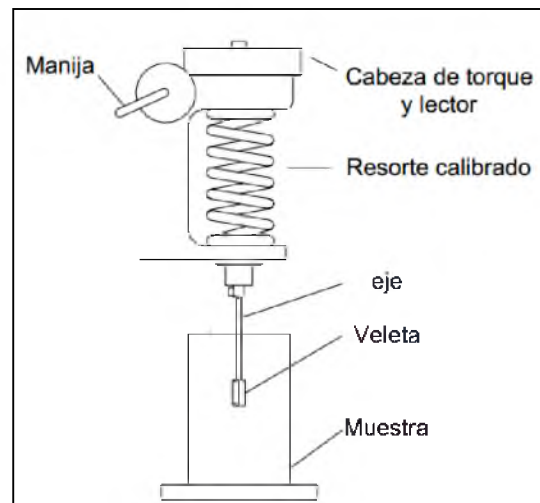


Figura 3.4. Equipo utilizado para el ensayo de corte con veleta

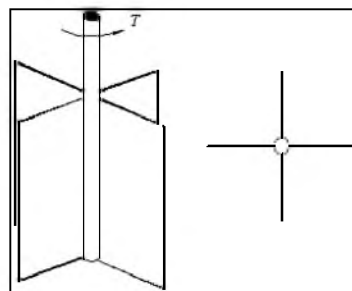


Figura 3.5. Extremo inferior de la veleta

#### **3.2.5.4 Curvas de Consolidación**

El objeto de una prueba de consolidación es determinar el decrecimiento de volumen y la velocidad con se produce la consolidación en un espécimen de suelo, confinado lateralmente y sujeto a una carga axial. Durante la prueba se aplica una serie de incrementos crecientes de carga axial y, por efecto de éstos, el agua tiende a salir del espécimen a través de un papel poroso colocado en sus caras. El cambio de volumen se mide con un micrómetro montado en un puente fijo y conectado a la placa de carga sobre la piedra porosa superior (Hartage & Horn, 1989). El equipo utilizado es marca ELE SoilTest, modelo C-320A.

Las lecturas del asentamiento para el espécimen se toman por 24 horas. Para cada incremento de carga aplicada se miden los cambios volumétricos, usando intervalos apropiados para efectuar las mediciones. Los datos registrados conducen a la obtención de la curva de consolidación. Dibujando las lecturas del micrómetro como ordenadas, en escala natural y los tiempos, como abscisas, en escala logarítmica (Hartage & Horn, 1989).

## 4 Capítulo Resultados

En este capítulo se presentan los resultados de los datos tomados en campo y de los ensayos llevados a cabo en los laboratorios.

### 4.1 Porcentaje de Compactación

Para el cálculo del porcentaje de compactación se obtuvo en campo la densidad seca “in situ” por medio del ensayo del cono de arena y se obtuvo en laboratorio la densidad máxima por medio del ensayo de Proctor Estándar.

#### 4.1.1 Densidad Seca

La densidad seca mejor conocida como densidad aparente fue tomada en las cuatro parcelas en diferentes momentos dependiendo de las diferentes operaciones mecanizadas, tal y como se explicó en el capítulo de metodología.

A continuación se presentan los resultados comparando los suelos de las parcelas que han sido operadas mecánicamente de manera semejante, es decir los tipos de suelos Molisol vrs Vertisol para parcelas con retoño (Figura 4.3) y los tipos de suelos Inceptisol vrs Vertisol para las parcelas preparadas para siembra (Figura 4.1).

En cuanto a la densidad, según el USDA.NRCS (1996) se consideran valores críticos de  $1.70 \text{ g/cm}^3$  para suelos francos y suelos franco arcillo arenosos y de  $1.4 \text{ g/cm}^3$  para suelos arcillosos (Cuadro 1.2), ocurriendo restricción en el desarrollo radicular.

Un aspecto importante a la hora de evaluar el efecto de la compactación en la densidad, es el contenido de materia orgánica; su alto contenido puede ampliar el límite de plasticidad, minimizando el aumento de la densidad. El contenido de materia (M.O.) de los suelos es muy variable. Un típico suelo de pradera (Molisol) puede contener 5 a 6 % de M.O. en los 15 cm superiores, mientras que un suelo arenoso aproximadamente 1% (Silva, 2011). Los valores de materia orgánica también se pueden interpretar como altos (mayor a 4.25%), medios (1.7% a 4.25%) o bajos (menor de 1.7%) para los primeros 15 cm de profundidad (Nuñez Solís, 2000). Por lo tanto se presentan además los resultados de materia orgánica obtenidos en laboratorio para cada parcela (Cuadro 4.1), y así poder relacionar dicho aspecto con los valores de densidad aparente.



Cuadro 4.1. Valores de Materia Orgánica para las diferentes parcelas

Orden	Parcela	M.O a 15 cm prof. (%)
Vertisol	1	2.29
Inceptisol	2	4.37
Vertisol	3	2.44
Mollisol	4	2.30

Con respecto a las cuatro parcelas con retoño y siembra de caña de azúcar se logra observar que los valores de densidad aparente en el orden de suelo Molisol e Inceptisol se encuentran por debajo del valor crítico, el cual es  $1.70 \text{ g/cm}^3$  (USDA.NRCS, 1996) y sucede lo mismo con el orden de suelo Vertisol, el cual tiene un valor crítico de  $1.40 \text{ g/cm}^3$  (USDA.NRCS, 1996). Esto demuestra que a pesar del uso de maquinaria pesada en el campo, la estructura del suelo aún no se ha visto afectada, esto se puede encontrar relacionado con el porcentaje medio de materia orgánica que presentan todos los suelos, en el único orden de suelo que se observa un porcentaje alto de materia orgánica es en el Inceptisol, situación inesperada, ya que es más usual encontrar valores altos de materia orgánica en los Molisoles (USDA, 2010).

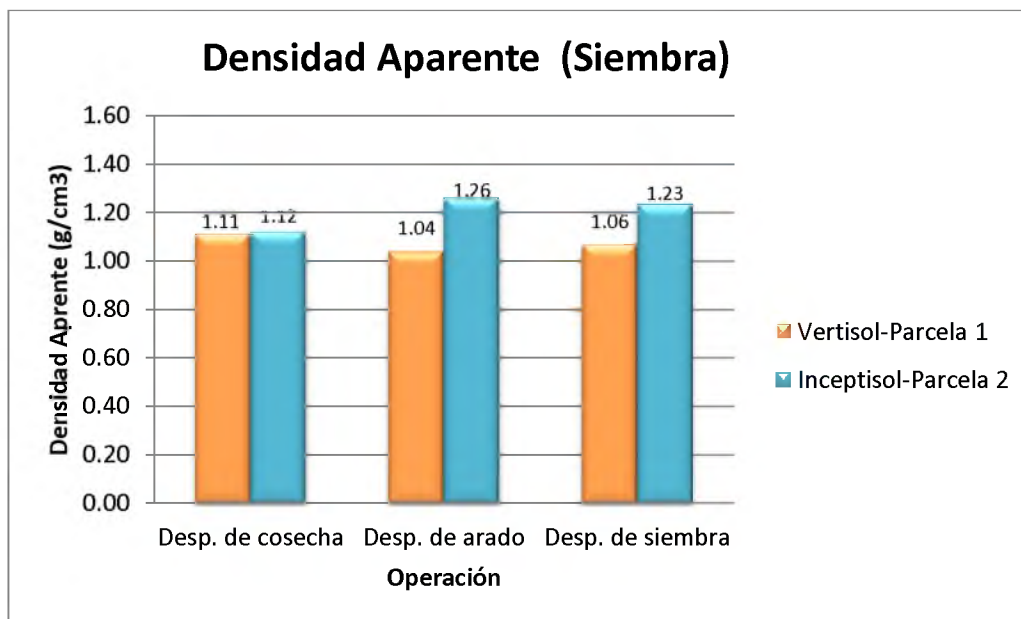


Figura 4.1. Densidad aparente obtenida en diferentes operaciones mecanizadas en parcelas con siembra de caña de azúcar

En el caso del Inceptisol (Parcela 2) con siembra de caña de azúcar (Figura 4.1) tomando en cuenta el momento de la operación mecanizada se observa un considerable aumento de  $1.12 \text{ g/cm}^3$  a  $1.26 \text{ g/cm}^3$  luego del paso del arado, situación inesperada, ya que el objetivo del arado es disminuir y no aumentar la densidad aparente, esto puede deberse a los 30 cm donde se obtuvo la muestra, se encuentra el piso arado (se observa más adelante en los resultados de resistencia a la penetración). Además se percibe una ligera disminución de  $1.26 \text{ g/cm}^3$  después de la siembra de la caña de azúcar, al ser poca la diferencia se puede decir que la disminución se encuentra dentro del porcentaje de error de la toma de datos.

Para el caso del Vertisol (Parcela 1), los valores se mantienen constantes, excepto una ligera disminución de la densidad aparente después del paso del arado. Es usual este comportamiento en los suelos de orden Vertisol, ya que al contraerse y expandirse se promueve la rotura del suelo, disminuyendo la densidad aparente del suelo (Figura 4.2).



Figura 4.2. Vertisol- Parcela 1, después de siembra. Contracción del suelo.

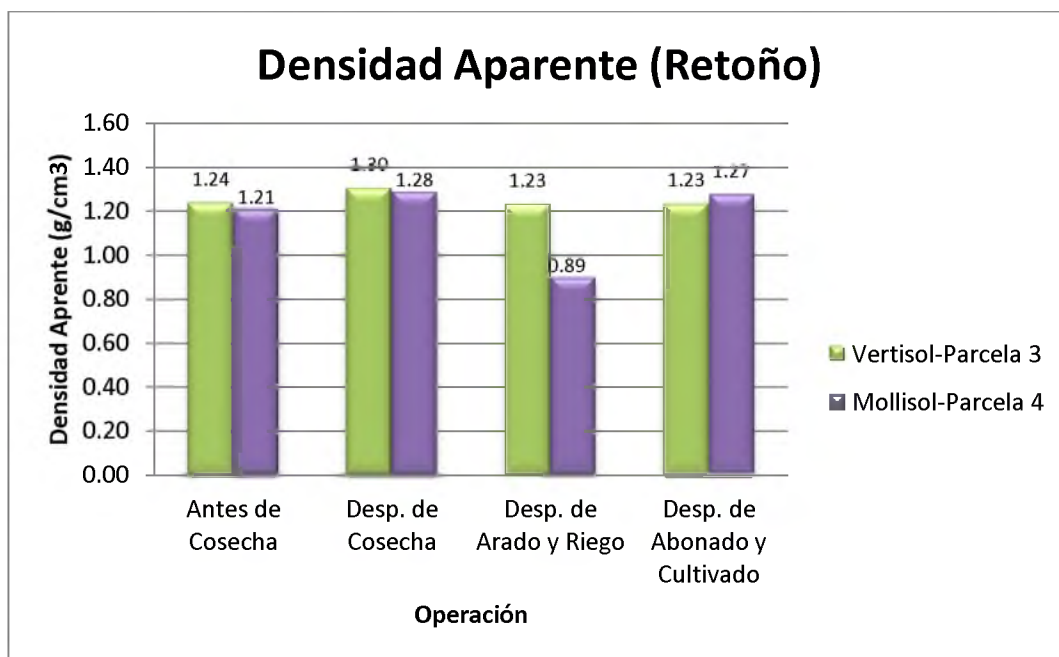


Figura 4.3. Densidad aparente obtenida en diferentes operaciones mecanizadas en parcelas con retoño de caña de azúcar

En el caso de las parcelas con retoño de caña de azúcar tomando en cuenta el momento de la operación mecanizada, la densidad aparente en el orden Molisol (Parcela 4) aumenta moderadamente de 1.21 a 1.28 g/cm<sup>3</sup> con el paso de la cosechadora de caña

de azúcar y disminuye considerablemente de 1.28 a 0.89 g/cm<sup>3</sup> con el paso del arado. Con las operaciones mecanizadas realizadas después del paso del arado la cuales son el abonado y cultivado vuelve a aumentar a un valor cercano al que se obtuvo después de la cosecha. Por lo tanto el objetivo de utilizar el arado para romper el suelo y reducir la densidad aparente no se está cumpliendo, ya que al finalizar el uso de la maquinaria pesada en la parcela, la densidad aparente vuelve al valor que se obtuvo antes de pasar el arado.

En el orden del suelo Vertisol, se debe tomar en cuenta que se trata de un suelo con un comportamiento diferente a los demás tipos de suelo, ya que se encuentra compuesto por un alto porcentaje de arcilla permitiendo la expansión y contracción del suelo (Figura 4.4). Al observar los valores de densidad aparente después de las operaciones mecanizadas, se percibe un aumento moderado de 1.24 a 1.30 g/cm<sup>3</sup> después del paso de la cosechadora de la caña de azúcar y una moderada disminución de 1.30 a 1.23 g/cm<sup>3</sup> después del paso del arado, manteniéndose el valor aún después de las demás operaciones mecanizadas.



Figura 4.4. Vertisol- Parcela 3, después de subsolado y riego. Contracción del suelo.

Al comparar los dos órdenes de suelo se observa que los valores más altos de densidad aparente los adquiere el Vertisol (Parcela 3), pero aún así los valores se

encuentran semejantes al Molisol, en el único caso que se ve una notable diferencia, es en el momento después del paso del arado, donde se disminuye aún más densidad aparente en el Molisol. Por lo tanto se logra discernir que el paso del arado obtiene mejores resultados en el Molisol que en el Vertisol.

#### 4.1.2 Densidad máxima y Humedad óptima

El ensayo de Proctor, para obtener la máxima compatibilidad, ha sido utilizado para predecir la estabilidad de las fundaciones de carreteras, casas y edificios pero recientemente ha sido utilizado para determinar la densidad máxima y la humedad óptima en suelos agrícolas (Thomas et al, 1996).

Además es importante tomar en cuenta que en la Figura 2.1 se comprueba que al ir aumentando la humedad y compactando, la densidad seca va aumentando hasta llegar a un punto de máximo para el par densidad seca máxima-humedad óptima, a partir de este punto un aumento de humedad no supone mayor densidad seca sino al contrario una disminución de ésta.

Al comparar los datos de densidad aparente mostrados en la Figura 4.6 y Figura 4.5, se observa que los datos son menores, pero cercanos a la densidad máxima mostrada en el Cuadro 4.2 para todas las parcelas muestreadas. Corroborando nuevamente que los suelos no han llegado a compactarse completamente.

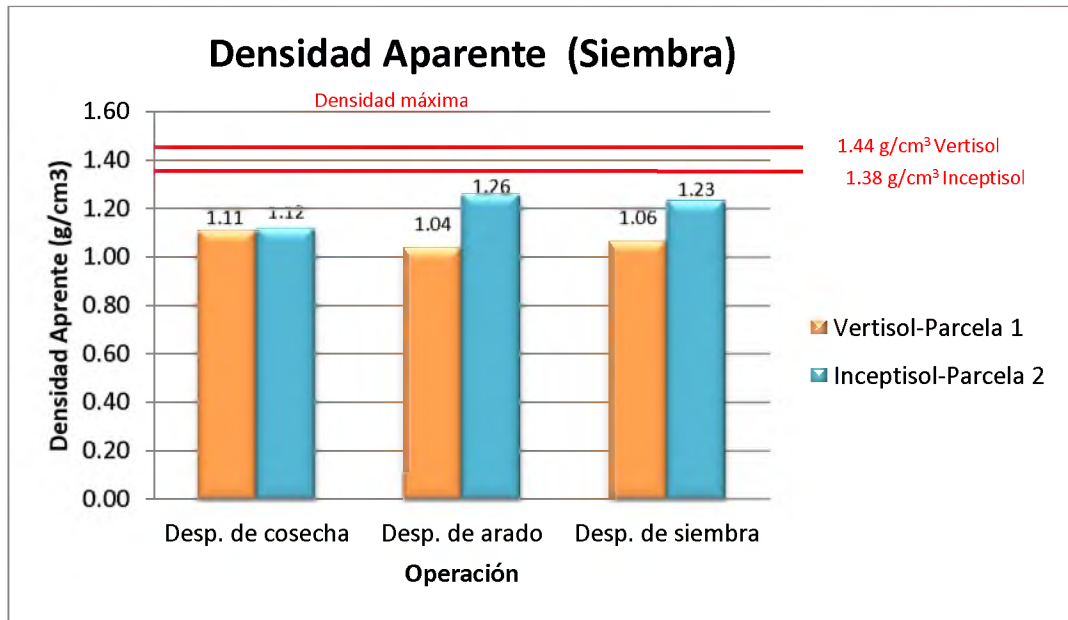


Figura 4.5. Densidad aparente de parcelas con siembra y su densidad máxima

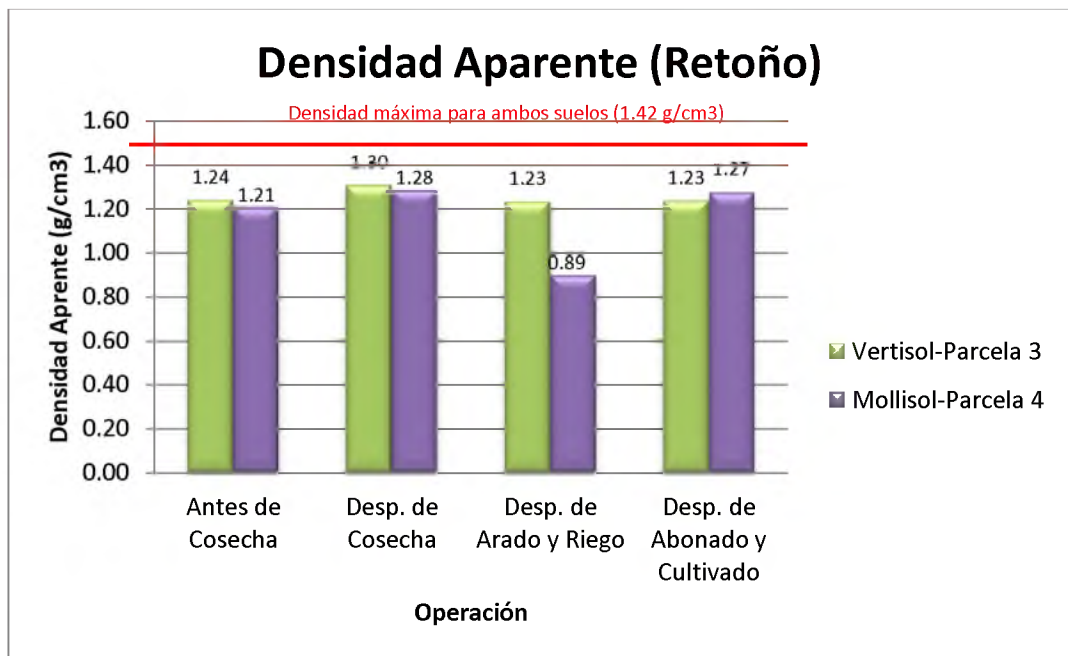


Figura 4.6. Densidad aparente de parcelas con retoño y su densidad máxima

Cuadro 4.2. Valores de Densidad máxima y humedad óptima de cada parcela

Parcela	Textura	Humedad óptima (%)	Densidad Máxima (g/cm <sup>3</sup> )	% Humedad a C.C
1	Vertisol	32	1.38	34
2	Inceptisol	26	1.44	30
3	Vertisol	27	1.42	33
4	Molisol	27	1.42	28

En el orden de suelo Inceptisol (Parcela 2) la densidad aparente máxima es de 1.44 g/cm<sup>3</sup>, siendo esta la mayor de todos los demás suelos estudiados, esto quiere decir que este suelo es menos susceptible a compactarse con valores de humedad de 26% con respecto a los demás suelos. La mayor densidad aparente “in situ” que se obtuvo fue de 1.26 g/cm<sup>3</sup>, con tal solo una 0.18 g/cm<sup>3</sup> de diferencia para poder llegar a su máxima densidad.

Para el caso del Molisol (Parcela 4) la densidad aparente máxima es de 1.42 g/cm<sup>3</sup> y la mayor densidad aparente “in situ” que se obtuvo fue de 1.28 g/cm<sup>3</sup>, con tal solo una 0.14 g/cm<sup>3</sup> de diferencia para poder llegar a su máxima densidad.

Relacionando los datos del Vertisol para el caso de la parcela con retoño (Parcela 3), se observa que la densidad aparente máxima es de 1.42 g/cm<sup>3</sup> y la mayor densidad aparente “in situ” que se obtuvo fue de 1.30 g/cm<sup>3</sup>, con tal solo una 0.12 g/cm<sup>3</sup> de diferencia para poder llegar a su máxima densidad, siendo esta parcela la cual se encuentra con el valor más cercano para llegar a la densidad máxima.

En cambio para el caso del Vertisol en la parcela con siembra (Parcela 1) la densidad aparente máxima es de 1.38 g/cm<sup>3</sup>, siendo esta la del menor valor y la más susceptible a compactación con valores de contenido de humedad del suelo de 32%. La mayor densidad aparente “in situ” que se obtuvo fue de 1.11 g/cm<sup>3</sup>, la cual también es la menor de las mayores densidades de los suelos estudiados. Se tiene una diferencia 0.27 g/cm<sup>3</sup> para poder llegar a su máxima densidad, siendo también el valor más lejano con respecto a los demás suelos para llegar a su densidad máxima. Es también importante observar en este caso que esta parcela es la que obtiene el mayor porcentaje de humedad

óptima (32%) comparado con los demás suelos que se encuentran en valores similares, debido a esta razón se puede deber la alta diferencia que hay entre la densidad máxima y la densidad “in situ”, ya que es un valor de humedad más difícil de llegar comparado con los valores de 26 y 27% de los demás suelos.

#### 4.1.3 Porcentaje de Compactación

El porcentaje de compactación se expresa como la densidad seca de un suelo en un porcentaje del máximo, tal como se define por el ensayo Proctor. Tal porcentaje puede exceder el 100%.

En la Mecánica de suelos el valor Proctor 100% se utiliza como base para medir el grado de compactación del suelo, siendo esta la medida estándar para la compactación. Por tanto, cuando se dice de un suelo compactado al 90% Proctor significa que la compactación en obra obtiene una densidad seca de al menos el 90% de la densidad seca máxima obtenida con los correspondientes ensayos.

Basándose en la Figura 8.30 (Ver Anexo), se logran obtener los porcentajes de compactación requeridos para los suelos muestreados en esta investigación, mostrados en el Cuadro 4.3. Dichos valores se utilizan para compactar suelos que logren soportar desde 0.30 m de relleno bajo pisos hasta 10 m de relleno bajo pavimentos o pisos, tomando como referencia que tan solo 2.50 m de relleno soporta edificios de hasta 2 pisos.

Cuadro 4.3. Porcentaje de compactación requerido para fundaciones en las parcelas en estudio

Parcela	Orden	Granulometría (USCS)	% Compactación requerida
1	Vertisol	CH	93
2	Inceptisol	CL	92-100
3	Vertisol	CH	93
4	Mollisol	ML	92-100



A continuación se presentan en la Figura 4.7 y Figura 4.8 los resultados de los porcentajes de compactación de cada parcela estudiada.

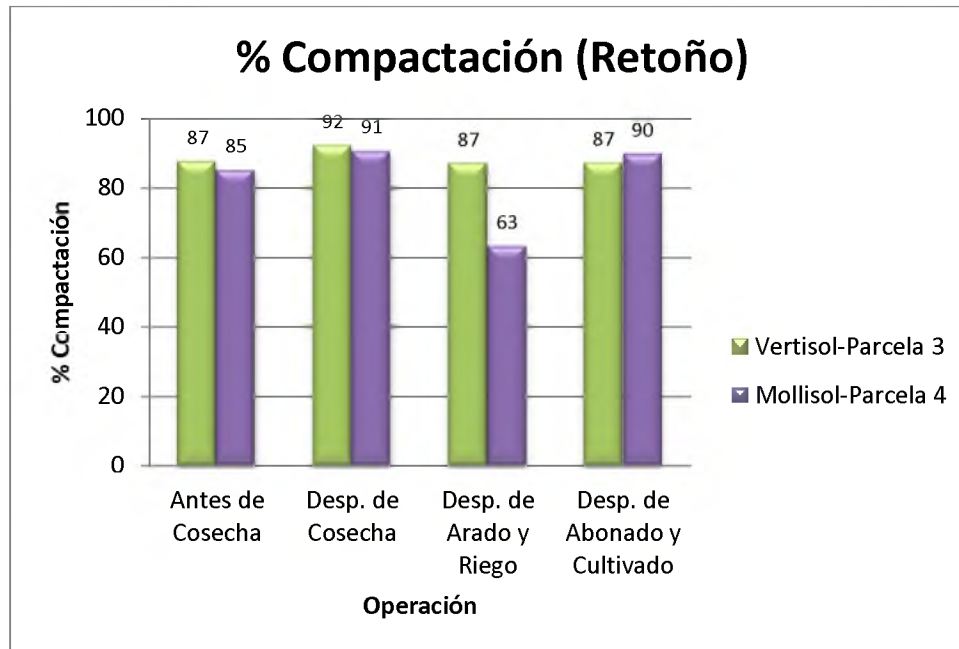


Figura 4.7. Porcentaje de compactación para las parcelas con retoño

Al analizar la Figura 4.7, se logra ver que en el caso del Molisol, para el momento después de cosecha y después del abonado y cultivado, los valores se encuentran muy cercanos al porcentaje de compactación requerido para realizar fundaciones o edificaciones (92%), siendo un resultado preocupante para suelos de uso agrícola.

Después del paso de la cosechadora el porcentaje de compactación aumenta un 6% y disminuye un 28% con el paso del arado, siendo esto beneficioso para el objetivo de tal labor, aunque a pesar de las intenciones se vuelve a aumentar el porcentaje de compactación a un 27% con el paso del abonado y cultivado, comportándose de igual manera que en los resultados de densidad aparente.

Luego al revisar el comportamiento del Vertisol en la parcela con retoño los valores también se encuentran muy cercanos al porcentaje de compactación requerido para fundaciones (93%), en el momento en que se encuentra el porcentaje de compactación más cercano al 93% es después del paso de la cosechadora con un 92%. Disminuye tan

solo un 6% con el paso del arado, llevándolo al valor obtenido antes del paso de la cosechadora.

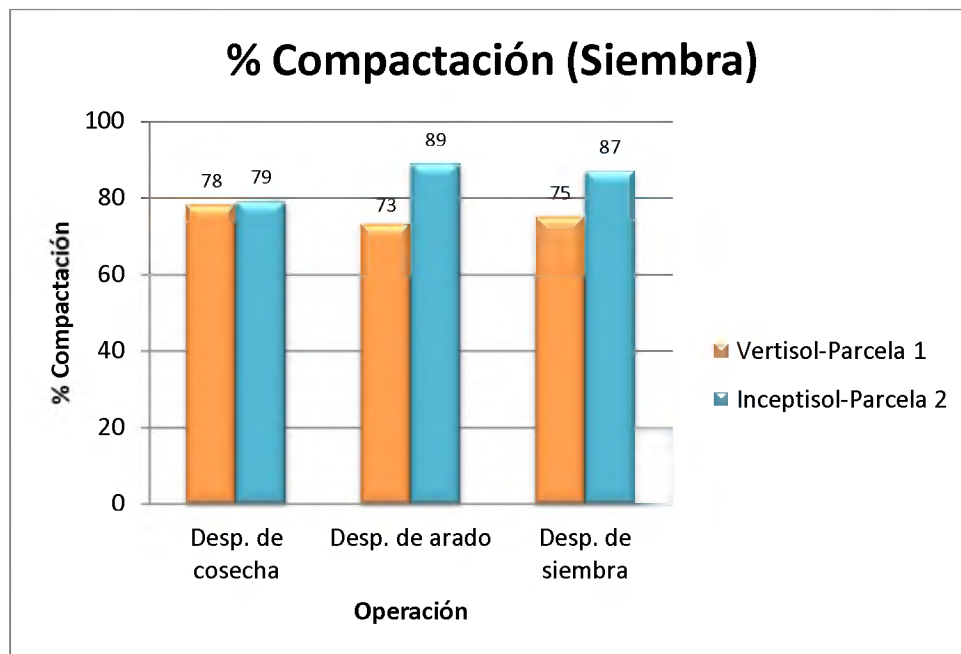


Figura 4.8. Porcentaje de compactación para las parcelas con siembra

Los valores presentados en la Figura 4.8 para el caso del Inceptisol y Vertisol en las parcelas con siembra son menores que lo presentados en las parcelas con retoño. Para el caso del Inceptisol, se da un comportamiento semejante que en los resultados de densidad aparente, resultando un aumento del porcentaje de compactación de 10% después del paso del arado y manteniendo un valor menor pero semejante después de la siembra. En el Vertisol se obtienen los menores porcentajes de compactación, obteniendo el mayor después de cosecha con un 78%, el cual se encuentra a un 15% de diferencia para poder obtener el porcentaje de compactación requerido para fundaciones.

## 4.2 Resistencia a la penetración

La resistencia a la penetración ha sido ampliamente utilizada para la identificación y caracterización de capas densificadas por efecto del laboreo y sus resultados se han visto correlacionados con el crecimiento de las raíces y productividad de los cultivos.

Basándonos en la Figura 8.31, se observa que valores mayores a 2.0 MPa son valores críticos que restringen el crecimiento de las raíces (Soil Survey Staff, 1993) y según Camargo (1997) los valores menores de 2.5 MPa son considerados bajos y presentan poca limitación para el desenvolvimiento de las raíces de caña de azúcar. Por lo que observa una contrariedad con respecto al valor crítico, dando a entender que es necesario una investigación en cuanto al valor crítico que restringe el desarrollo de las raíces de, específicamente, la caña de azúcar. Para este caso se basará en el valor de 2.0 MPa dado por el Soil Survey Staff (1993), ya que se trata de mayor cantidad de investigaciones las cuales han coincidido con el mismo valor crítico, siempre tomando en cuenta que es para cualquier tipo de raíz.

A continuación se presentan los resultados de resistencia a la penetración tomados en las cuatro parcelas a tres diferentes profundidades y en diferentes momentos.

Se debe tomar en cuenta que los primeros 30 cm superficiales de la capa de suelo son los críticos para el crecimiento de las raíces de la caña de azúcar (Espinosa, 1980). Usualmente para el caso del laboreo de las cuatro parcelas estudiadas se da una rotura del suelo principalmente en los primeros 15 cm y puede llegar hasta los 20 cm, esto se muestra en los resultados. Además también se debe recordar que en el caso de las parcelas con retoño, se da la rotura de suelo solamente en el entresurco.

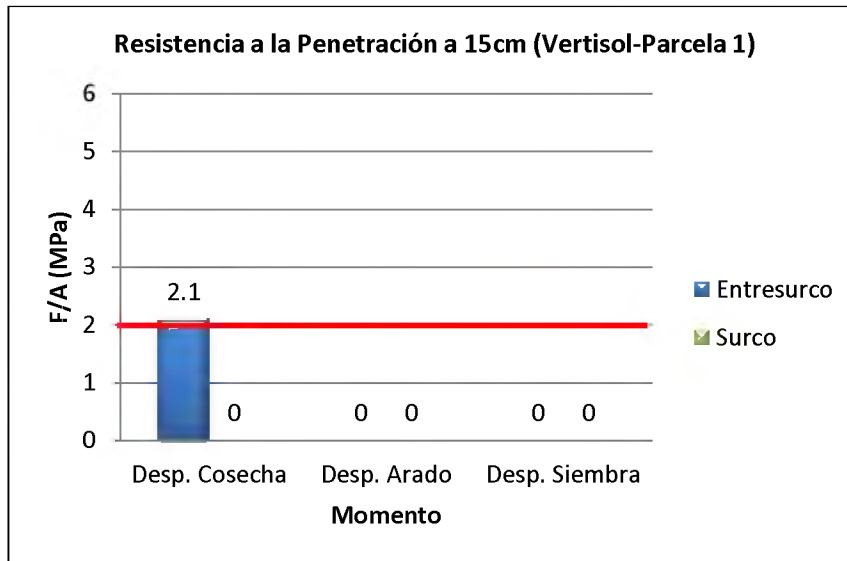


Figura 4.9. Resistencia a la penetración para cada momento a 15 cm de profundidad en la Parcela 1

En los Vertisoles se debe de tomar en cuenta el particular comportamiento que estos suelos tienen, ya que se dan cambios en las propiedades físicas e hidrológicas durante los ciclos de secado-contracción y mojado-expansión (Cerana et al, 2005), permitiendo la natural roturación del suelo, disminuyendo dicha resistencia mecánica.

En la Figura 4.9 se puede observar únicamente el valor de 2.1 MPa en el entresurco después de la cosecha, siendo un valor mayor que el crítico (2.0 MPa), dando a entender que en ese momento el suelo no permite el buen desarrollo de las raíces. En los demás momentos no se obtuvieron datos debido a la selección de datos que se realizó, explicado en metodología. Después de siembra no se presentan resultados a los 15 cm, ya que a esta profundidad el suelo se encontraba completamente roturado.

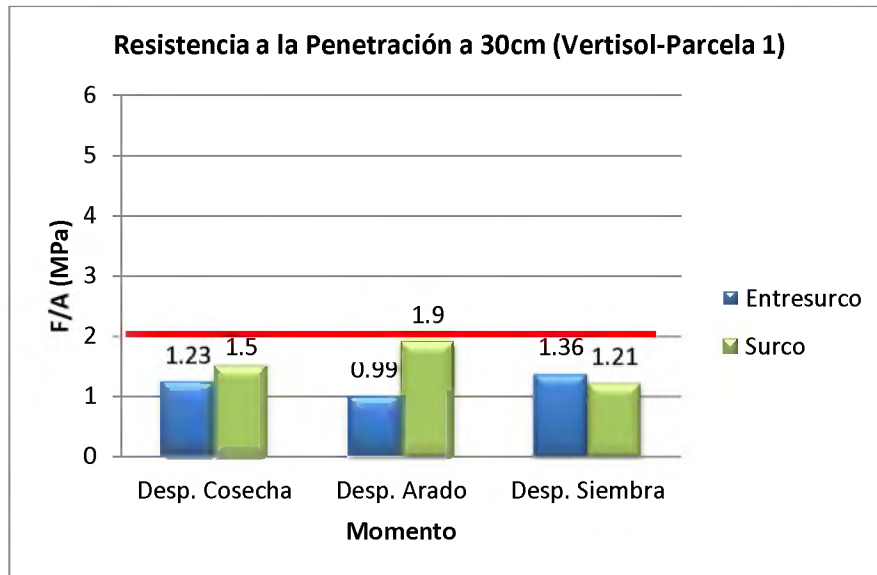


Figura 4.10. Resistencia a la penetración para cada momento a 30 cm de profundidad en la Parcela 1

En la Figura 4.10 se ven valores menores al crítico después de cosecha en el entresurco y surco. Después del arado se da una disminución considerable de la resistencia a la penetración en el entresurco y un significativo un aumento en el surco llegando a tener un valor cercano al crítico. Luego después de siembra disminuye significativamente la resistencia a la penetración en el surco, resultando un valor a un menor que el que se encontró después de cosecha, estos valores pueden deberse a que después del arado se da el afinamiento y el roturado del suelo influyendo aún a profundidades de 30 cm.

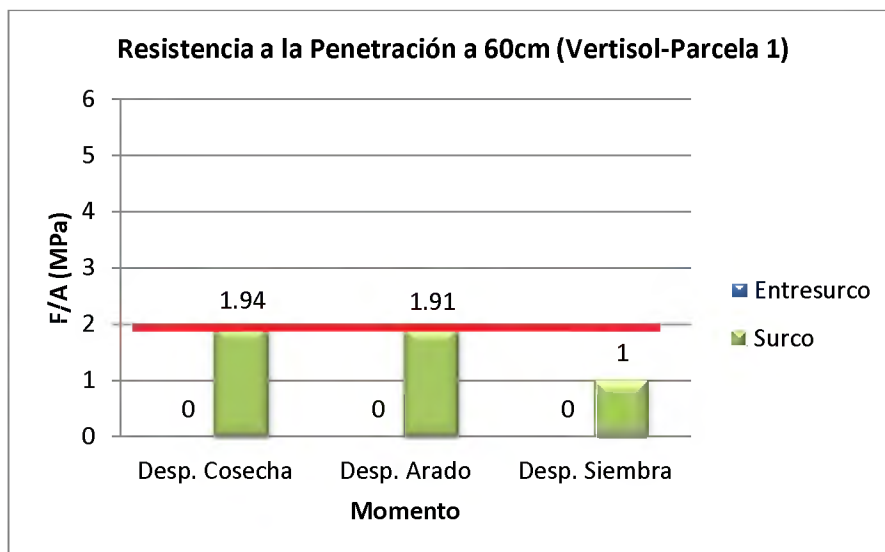


Figura 4.11. Resistencia a la penetración para cada momento a 60 cm de profundidad en la Parcela 1

En la Figura 4.11 se observan solamente los valores en el surco, ya que los del entresurco no pudieron ser seleccionados debido a que no hubo correlación entre el contenido de humedad del suelo y la resistencia a la penetración. A pesar de esto se pueden tomar los valores de surco semejantes al entresurco después del arado, ya que para esta operación desaparece completamente tal distinción. Por lo tanto se observa que en surco la cosechadora de caña de azúcar influye más a los 60 cm que a los 30 cm después de la cosecha y después del arado se mantiene en un valor semejante, por lo que se comprueba que no se realiza alguna roturación a tal profundidad, y puede ser que se encuentre el piso de arado a los 60 cm de profundidad. Y después de siembra se vuelve a dar la disminución de la resistencia a la penetración, disminuyendo aun más que a los 30 cm de profundidad.

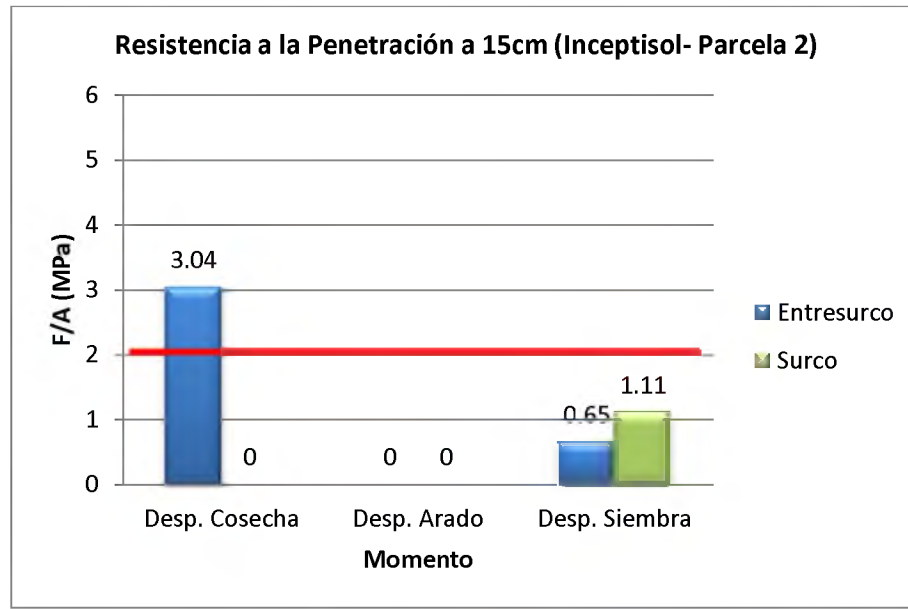


Figura 4.12. Resistencia a la penetración para cada momento a 15 cm de profundidad en la Parcela 2

Al analizar la Figura 4.12 se observa que el valor de resistencia a la penetración después de cosecha en el entresurco sobrepasa por más de 1 MPa el valor crítico, aunque a pesar de tan alto valor, este disminuye en el momento después de la siembra del cultivo, (también debido al afinamiento y el roturado del suelo que se da después del arado) manteniendo valores bajos de resistencia a la penetración los cuales permiten el buen desarrollo de las raíces. Los demás valores no se presentan ya que no pudieron ser seleccionados debido a que no hubo correlación entre el contenido de humedad del suelo y la resistencia a la penetración.

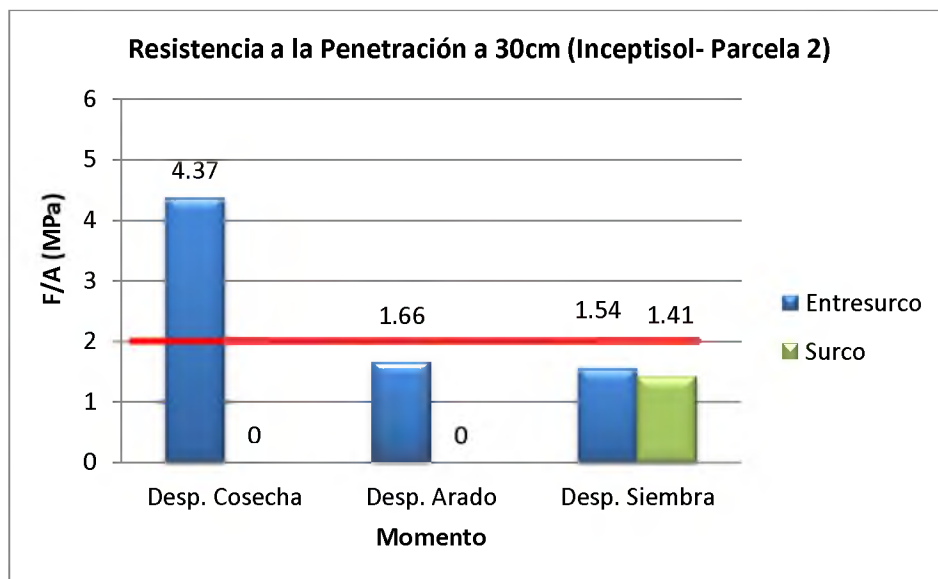


Figura 4.13. Resistencia a la penetración para cada momento a 30 cm de profundidad en la Parcela 2

En la Figura 4.13 se ve un valor de resistencia a la penetración, después de la cosecha, aun mayor que el observado a 30 cm. Después del arado se ve una considerable disminución en el entresurco, por lo que se concluye que el arado influyo a tal profundidad, no se pude decir que roturo, ya que se pudieron tomar los datos a esta profundidad, si el suelo se hubiera roturado a 30 cm el suelo hubiera quedado completamente suelto, dificultando la toma de datos. A pesar de esto el paso del arado lleva el suelo a condiciones adecuadas para el buen desarrollo de las raíces, con un valor menor al crítico. Además se observa una disminución después de la siembra dando a entender que los trabajos de roturado después del arado llegan a influir a profundidades de 30 cm. Los demás valores no se presentan ya que no pudieron ser seleccionados debido a que no hubo correlación entre el contenido de humedad del suelo y la resistencia a la penetración.



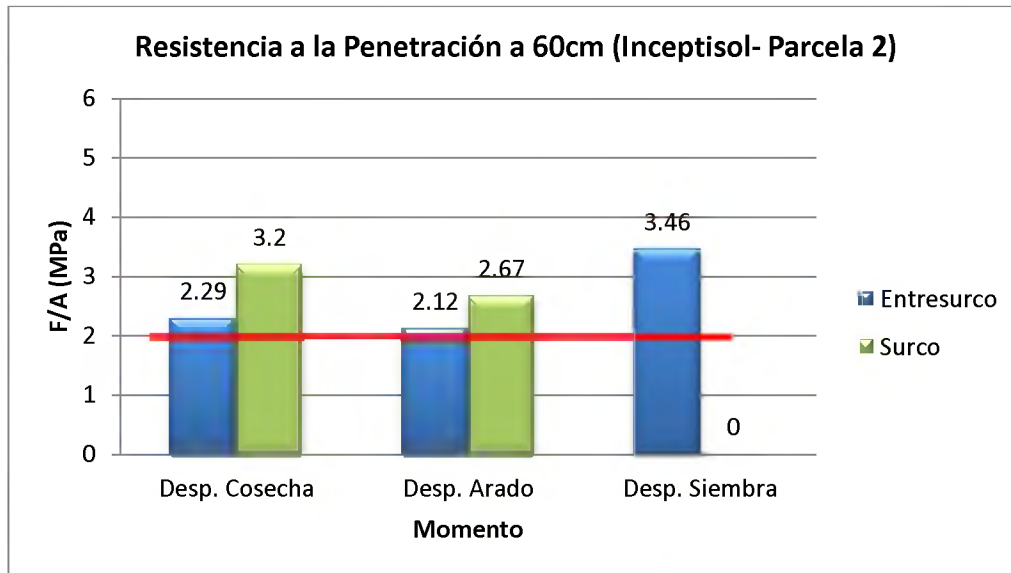


Figura 4.14. Resistencia a la penetración para cada momento a 60 cm de profundidad en la Parcela 2

Al observar la Figura 4.14 se concluye que a los 60 cm se encuentra el piso de arado, ya que para todos los momentos existen valores mayores que el crítico y para los momentos después de arado y después de siembra se encuentran valores mayores que los encontrados a 15 y 30 cm, por lo que se ve que se está dando mayor compactación a los 60 cm. El valor de surco después de siembra no pudo ser seleccionado debido a que no hubo correlación entre el contenido de humedad del suelo y la resistencia a la penetración.

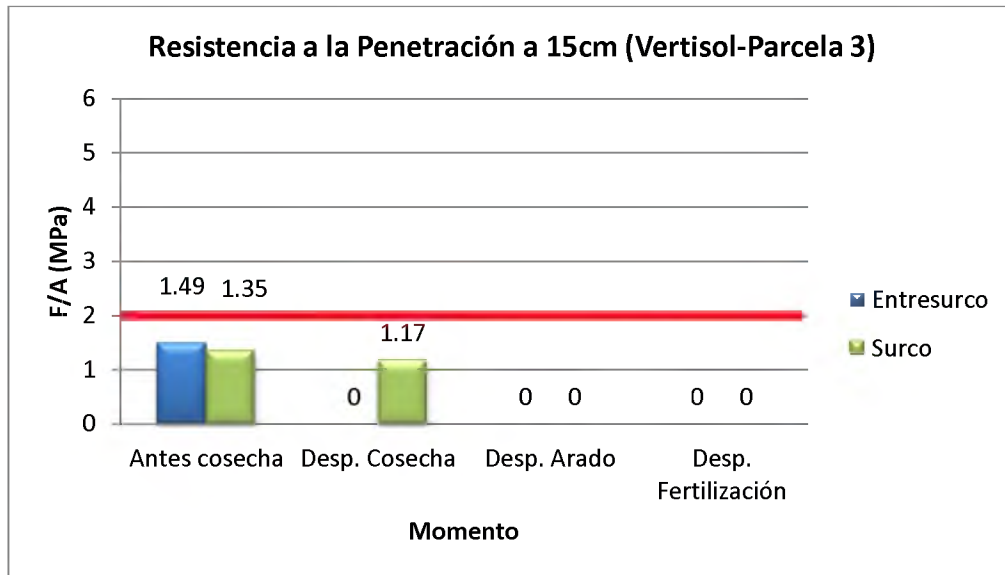


Figura 4.15. Resistencia a la penetración para cada momento a 15 cm de profundidad en la Parcela 3

En la parcela 3, la cual es de un tipo de suelo Vertisol, es la que presenta los valores de resistencia a la penetración más bajos en todas las profundidades y para todos los momentos que se logran presentar. Se logra observar una significativa disminución de la resistencia a la penetración después de la cosecha en el surco en la Figura 4.15, situación inesperada ya que ha sido pasada una maquinaria pesada en el campo, produciendo únicamente carga sobre el suelo, por lo que tal dato puede deberse a error de medición. No se presentan los datos después del arado en el entresurco, ya que se roturo el suelo a mas de 15 cm, por lo que se dificulto la toma de datos, para los demás momentos no se logro encontrar correlación entre la resistencia a la penetración y la humedad, por lo tanto no se seleccionaron dichos datos.

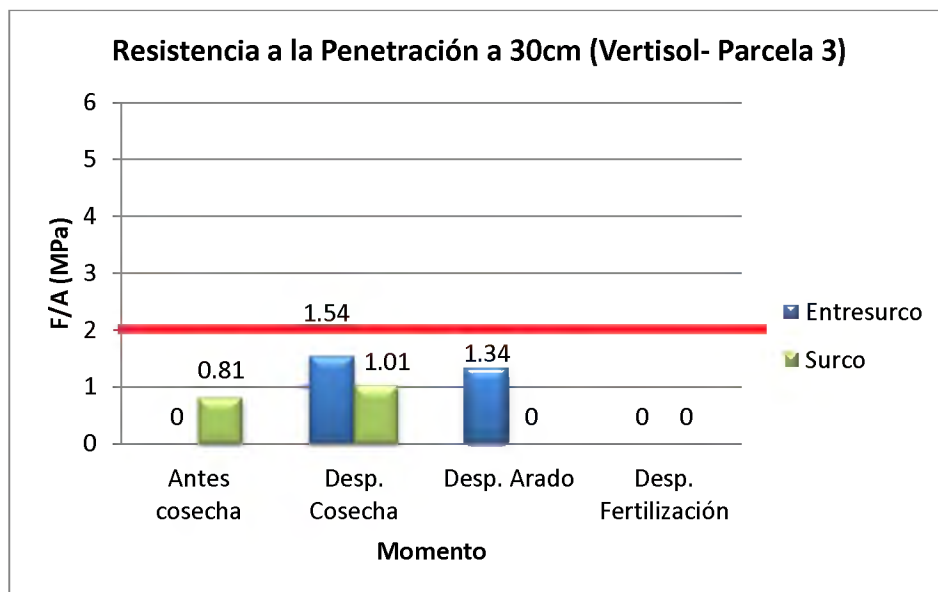


Figura 4.16. Resistencia a la penetración para cada momento a 30 cm de profundidad en la Parcela 3

En la Figura 4.16 se observa el comportamiento esperado, un aumento después de la cosecha, en este caso se puede corroborar que sucede en el surco, aun así no llega a valores críticos para el desarrollo de las raíces. Después del arado se da una significativa disminución en el entresurco por lo que se puede decir que el subsolador utilizado en esta parcela si influyo a una profundidad de 30 cm, sucediendo lo mismo que la Parcela 2. Los demás valores no se presentan ya que no pudieron ser seleccionados debido a que no hubo correlación entre el contenido de humedad del suelo y la resistencia a la penetración.

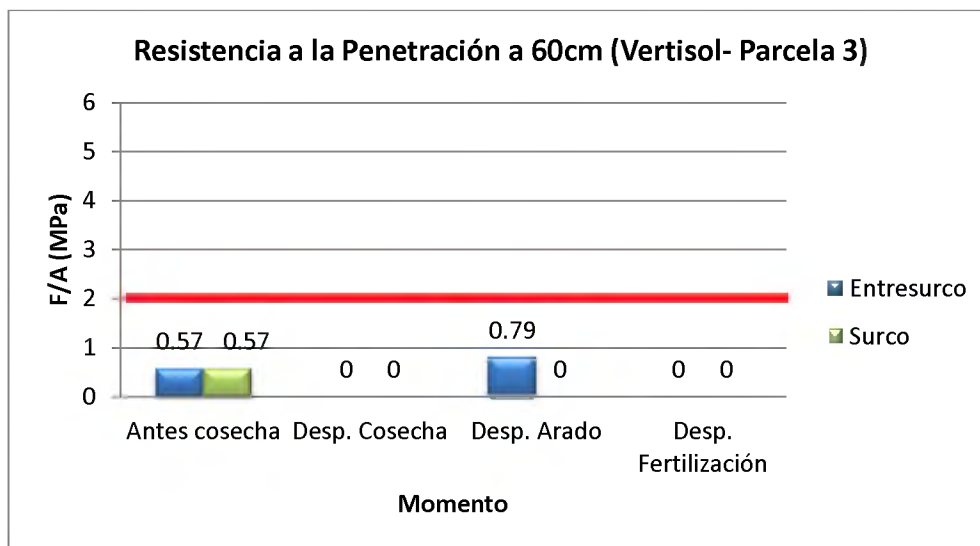


Figura 4.17. Resistencia a la penetración para cada momento a 60 cm de profundidad en la Parcela 3

La resistencia a la penetración de la parcela 3 a una profundidad de 60 cm mostrada en la Figura 4.17 presenta valores bajos y lejanos al crítico aun después del arado. A pesar de que el valor aumenta en entresurco después de que se pasa el arado, la resistencia sigue siendo baja y adecuada para el buen desarrollo de las raíces. Los demás valores no se presentan ya que no pudieron ser seleccionados debido a que no hubo correlación entre el contenido de humedad del suelo y la resistencia a la penetración.

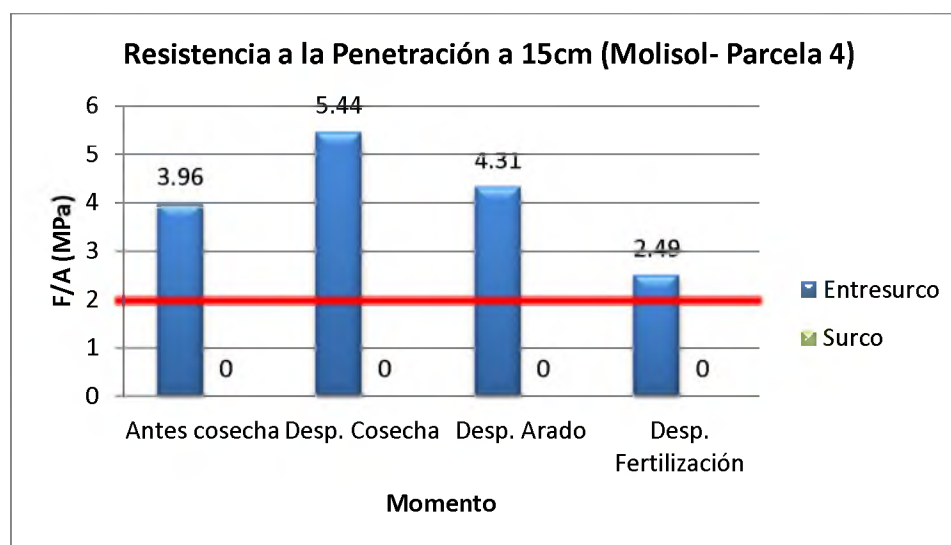


Figura 4.18. Resistencia a la penetración para cada momento a 15 cm de profundidad en la Parcela 4

En la Parcela 4 es donde se encuentran los valores más altos de resistencia a la penetración, duplicando los valores críticos en más de un caso. En la Figura 4.18 donde se presentan los datos tomados a 15 cm de profundidad en el entresurco, se puede observar que desde antes de la cosecha el suelo se encontraba ya con un valor mayor al crítico (3.96 MPa), después del paso de la cosechadora este valor aumenta a un mas llegando a ser más del doble del valor crítico. Después del arado el valor disminuye, pero aun sigue siendo más del doble de 2.0 MPa (valor crítico), y es importante notar que solamente en este suelo se pudieron obtener datos después del arado a 15 cm, esto quiere decir que el arado no llego a roturar a los 15 cm, porque de ser así el suelo se hubiera encontrado suelto y no hubiera sido posible tomar los datos.

Después de fertilización se da una disminución de la resistencia a la penetración, situación inesperada ya que después del arado no se da otra labor de roturación excepto la que se utiliza para fertilizar, por lo que se puede decir que esta labor influencia en la descompactación del suelo.

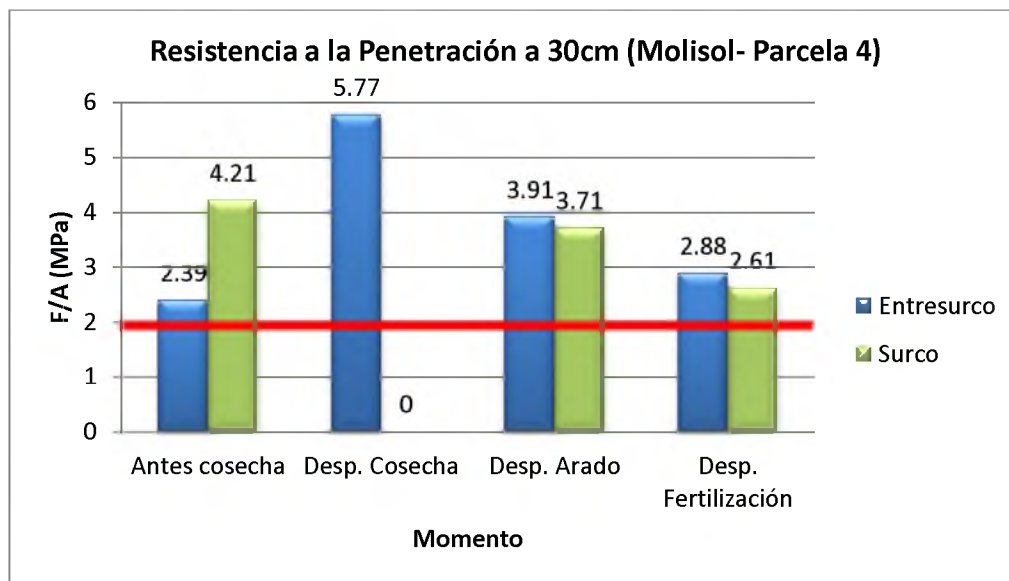


Figura 4.19. Resistencia a la penetración para cada momento a 30 cm de profundidad en la Parcela 4

En la Figura 4.19 se da el mismo comportamiento que a los 15 cm de profundidad en el entresurco (Figura 4.18). Para el caso del surco solamente en el caso antes de la cosecha se muestra un valor mucho mayor que el entresurco, llegando a duplicarlo, situación esperada ya que el surco no ha sido trabajado desde hace 3 años y se han ido acumulando todas las cargas horizontales de la maquinaria utilizada en campo, a pesar de esto se ve la influencia de la labor de arado en el suelo, ya que disminuye la resistencia a la penetración después del arado, pero aun así continua siendo un valor que restringe el desarrollo de las raíces de la caña de azúcar.

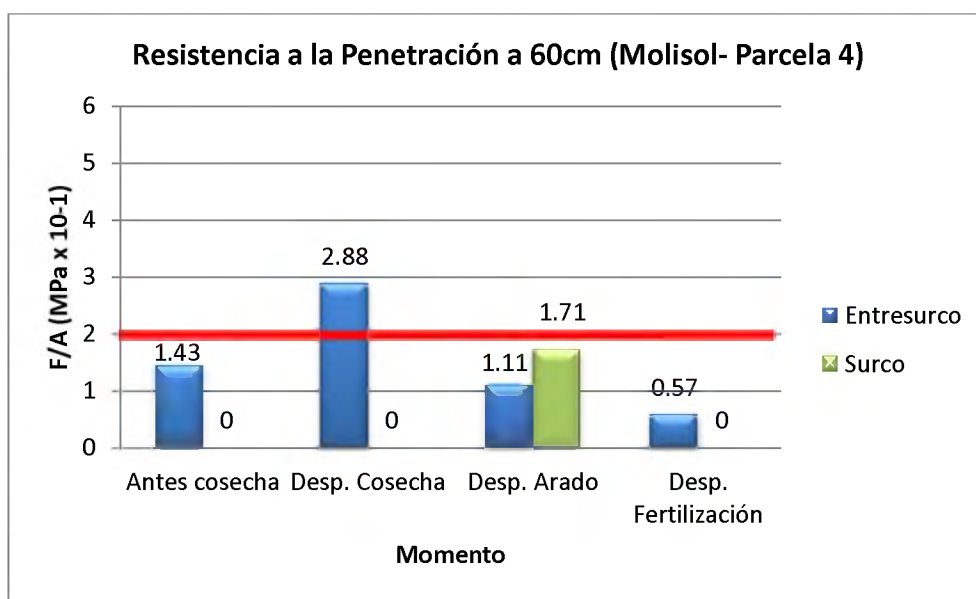


Figura 4.20. Resistencia a la penetración para cada momento a 60 cm de profundidad en la Parcela 4

A los 60 cm de profundidad (Figura 4.20) se muestran valores mucho menores que los que existen a 15 y a 30 cm, solamente después de cosecha se presenta un valor mayor al crítico. Después del arado se disminuye la resistencia a la penetración hasta un valor adecuado para el desarrollo de las raíces.

Es importante notar que debido a los altos valores que se encuentran a 30 cm y como estos disminuyeron a 60 cm se puede decir que el piso de arado se encuentra a los 30 cm.

## 4.3 Datos relacionados con maquinaria

### 4.3.1 Cargas de la maquinaria

La curva de consolidación presenta el comportamiento mecánico del suelo ante esfuerzos crecientes. El objetivo más importante de esta curva para esta investigación es el llamado punto de precompactación el cual indica la máxima carga mecánica que el suelo puede soportar previo al colapso (Ver Figura 8.74, Figura 8.75, Figura 8.76, Figura 8.77., Figura 8.78, Figura 8.79).

Al comparar los resultados de los puntos de precompactación de cada parcela (Cuadro 4.4) con las cargas mínimas y máximas aplicadas en cada una de ellas debido al eje trasero del tractor (Cuadro 4.5, Cuadro 4.6, Cuadro 4.7, Cuadro 4.8), se logra apreciar que en todos los casos se aplican cargas mayores a las que puede soportar el suelo previo al colapso. Inclusive las cargas mínimas aplicadas a los diferentes tipos de suelos sobrepasan los puntos de precompactación. Esto demuestra cómo existe una falta de eficiencia en el uso de maquinaria, ya que según lo visto en campo hay un faltante de comprensión en cuanto a que es necesario dar un manejo específico dependiendo de las características del suelo, es decir, no se debería utilizar la misma maquinaria para todos los tipos de suelos, ya que algunos pueden soportar mayores cargas que otros.

Otra importante observación es el hecho de que las cargas máximas en todos los casos son debido a la cosechadora de caña de azúcar y las carretas autovolteo, esto muestra como el paso de esta maquinaria pesada es la que degrada mayormente el suelo, provocando en el Molisol cargas 7 veces mayores que las que puede soportar el suelo y en el Inceptisol y Vertisol cargas 4 veces mayores (en promedio) que el punto de precompactación. Las cargas mínimas son dadas principalmente por la maquinaria especial para roturar el suelo y además los conformadores e incorporadores.

Se debe recordar que estas cargas se aplican anualmente en parcelas que se preparan para siembra como mínimo cada 5 años, por lo que se debe también tomar en cuenta la acumulación de cargas que va sufriendo el suelo al pasar de los años. Como se

explico en el capítulo de metodología, las cargas presentadas se tratan de parcelas con retoño que tienen 3 años de cosecha, o por así decirlo se encuentran a 2 años de renovación y preparación para una nueva siembra.

Cuadro 4.4. Puntos de precompactación para cada orden de suelo

Parcela	Orden de Suelo	Precompactación (KPa)	
		15 cm	30 cm
1	Vertisol	50	51
2	Inceptisol	48	50
4	Molisol	32	58

Más detalladamente en el orden de suelo Molisol, se da una diferencia en el punto de precompactación en la profundidad a 15 cm y a 30 cm (Cuadro 4.4), esto puede estar relacionado a dos situaciones, la primera es que probablemente se encuentre mayor cantidad de materia orgánica a los 30 cm que a los 15cm, ya que la superficie del suelo es la más disturbada, la segunda situación se puede dar por el hecho de que la capa de suelo a los 30 cm se encuentra ya lo suficientemente compactada como para soportar mayor carga, o también se puede dar por una mezcla de ambas.

En el Cuadro 4.5 se observa que las cargas mínimas aplicadas se tratan de tractores de 135 HP de potencia con implementos como el escarificador e incorporador lo cual es de esperarse ya que son de los implementos de menor peso (Ver Anexo Cuadro 8.24). Al analizar la carga media de toda la maquinaria utilizada en esta específica parcela (Ver Anexo Cuadro 8.6) se deduce que se duplica las carga máxima que puede soportar el Molisol antes del colapso a una profundidad de 30 cm y se cuadruplica a una profundidad de 15 cm.



Cuadro 4.5. Cargas máximas y mínimas aplicadas en el Molisol con cultivo en retoño

<b>Parcela 4 - Molisol</b>		
	<b>Maquinaria</b>	<b>Carga (Kpa)</b>
<b>Equipos que producen Cargas máximas</b>	Cosechadora 3510	220
	Carreta autovolteo + TM7010	189
<b>Equipos que producen Cargas mínimas</b>	TM7010 + Incorporador	97
	Case Int MX135 + Escarificador	86
<b>Promedio Carga</b>		144

En el Vertisol (Parcela 3) se observa en el Cuadro 4.4 como el punto de precompactación es semejante a 15cm y 30 cm de profundidad con 50 y 51 KPa respectivamente, y comparando estos datos con el Cuadro 4.6, se observa que ambas cargas mínimas sobrepasan la carga crítica, siendo para este caso el escarificador y el subsolador con tractores de 135 HP. La carga media de toda la maquinaria utilizada en esta específica parcela (Ver Anexo Cuadro 8.7) triplica la carga máxima que puede soportar el Vertisol antes del colapso. Además se puede observar que se utiliza prácticamente la misma maquinaria para el Molisol y el Vertisol, siendo estos suelos con comportamientos completamente distintos.

Cuadro 4.6. Cargas máximas y mínimas aplicadas en el Vertisol con cultivo en retoño

<b>Parcela 3- Vertisol</b>		
	<b>Maquinaria</b>	<b>Carga (Kpa)</b>
<b>Equipos que producen Cargas máximas</b>	Cosechadora 3510	220
	Carreta autovolteo + TM7010	187
<b>Equipos que producen Cargas mínimas</b>	TM7010 + Escarificador	89
	Case Int MX135 + Subsolador	91
<b>Promedio Carga</b>		126

Para el caso del Inceptisol se observa en el Cuadro 4.4 como el punto de precompactación es semejante a 15cm y 30 cm de profundidad con 48 y 50 KPa respectivamente, y al comparar estos datos con las cargas mínimas del Cuadro 4.6, se logra ver que el arado de cincel con un tractor dual de 200 HP es la que produce menor carga en el suelo, pero aún así sobrepasa la carga crítica dada por el punto de precompactación. La carga media de toda la maquinaria utilizada en esta específica parcela (Ver Anexo Cuadro 8.8) triplica la carga máxima que puede soportar el Inceptisol antes del colapso.

Cuadro 4.7. Cargas máximas y mínimas aplicadas en el Inceptisol con siembra de cultivo

<b>Parcela 2- Inceptisol</b>		
	<b>Maquinaria</b>	<b>Carga (Kpa)</b>
<b>Equipos que producen Cargas máximas</b>	Cosechadora 3510	220
	Carreta semilla + TM7010	205
<b>Equipos que producen Cargas mínimas</b>	TG245 + Arado de cincel	62
	TM7010 + Conformador	89
<b>Promedio Carga</b>		146

Analizando el Cuadro 4.8 se aprecia que la carga mínima aplicada al Vertisol es también el arado de cincel con el tractor dual de 200 HP, y a pesar de ser el tractor con mayor peso, tal y como se muestra en el Anexo Cuadro 8.24, es uno de los que produce menor carga, esto debido a que tiene mayor área de contacto por las 4 llantas traseras (Ver Anexo Cuadro 8.25), distribuyendo la aplicación de carga. La carga media de la maquinaria utilizada para la preparación de suelos para la siembra de caña de azúcar aplicada a este suelo es de 159 KPa, el cual también triplica el punto de compactación (51 KPa).

Cuadro 4.8. Cargas máximas y mínimas aplicadas en el Vertisol con siembra de cultivo

<b>Parcela 1- Vertisol</b>		
	<b>Maquinaria</b>	<b>Carga (Kpa)</b>
<b>Equipos que producen Cargas máximas</b>	Carreta semilla + TM7020	277
	Cosechadora 3510	220
<b>Equipos que producen Cargas mínimas</b>	TG245 + Arado cincel	62
	TG245 + Rastra	78
<b>Promedio Carga</b>		159

#### 4.3.2 Humedades óptimas para labores

A continuación se muestran los gráficos de límites de consistencia, los cuales presentan los ámbitos de elasticidad (friabilidad) y plasticidad del suelo en términos de humedades. Además en los gráficos se pueden apreciar los límites de punto de marchitez permanente (P.M.P), límite plástico superior (L.P.S) y el límite plástico inferior (L.P.I) para cada tipo de suelo (Cuadro 4.9).

Cuadro 4.9. Valores de C.C, P.M.P, L.P.S, L.P.I y Humedad óptima para cada parcela

Parcela	% C.C (-0.33 Mpa X 10 <sup>-1</sup> )	% P.M.P (-15 Mpa X 10 <sup>-1</sup> )	L.P.S (%)	L.P.I (%)	% Humedad óptima
1	34	25	97.74	28.40	32
2	31	20	46.05	29.54	26
3	33	25	83.90	26.69	27
4	28	19	40.16	30.41	27

Estos resultados se presentan más que todo para recomendar los porcentajes de humedad a los que se debe trabajar mecánicamente para cada tipo de suelo estudiado, ya que estos varían dependiendo de las características del suelo.

En la Figura 4.21 se presenta el ámbito plástico y friable del Inceptisol (Parcela 2), y se deduce que los porcentajes adecuados para el uso de maquinaria agrícola en el suelo son desde 22% hasta 24% de contenido de humedad, disminuyendo un 2% los valores críticos a los que no se debe trabajar, tomando como referencia el punto de marchitez permanente y el porcentaje de humedad óptima para compactar el suelo (obtenido con la Prueba Proctor), ya que se observa que el porcentaje de capacidad de campo es 5% mayor en contenido de humedad que la porcentaje de humedad óptima.

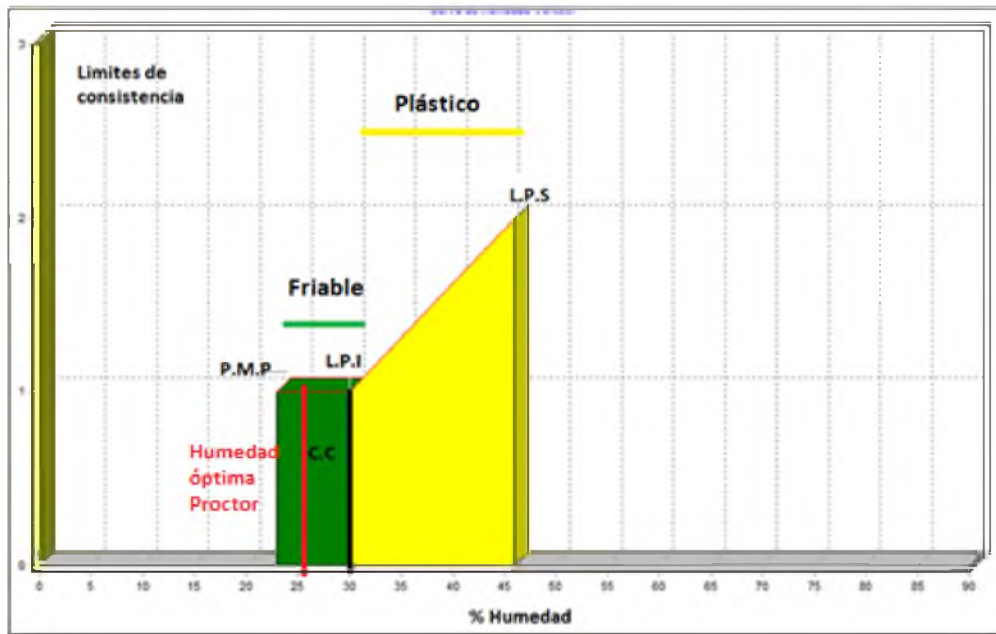


Figura 4.21. Curva de límites de consistencia del Inceptisol-Parcela 2

Para el caso del Molisol presentado en la Figura 4.22 el ámbito friable inicia desde 19% hasta 30% siendo un ámbito mayor que el presentado para el Inceptisol, y permitiendo mayor confianza a la hora de operar mecánicamente, aunque lo recomendable para este caso sería trabajar a contenidos de humedad entre 21 y 25% de igual manera tomando como referencia el punto de marchitez permanente y el porcentaje de humedad óptima para compactar el suelo. Definitivamente un porcentaje de contenido de humedad mayor a la humedad óptima no es recomendable introducir maquinaria pesada en el campo, ya que se encontraría en el estado plástico, donde se produce compactación de suelos.

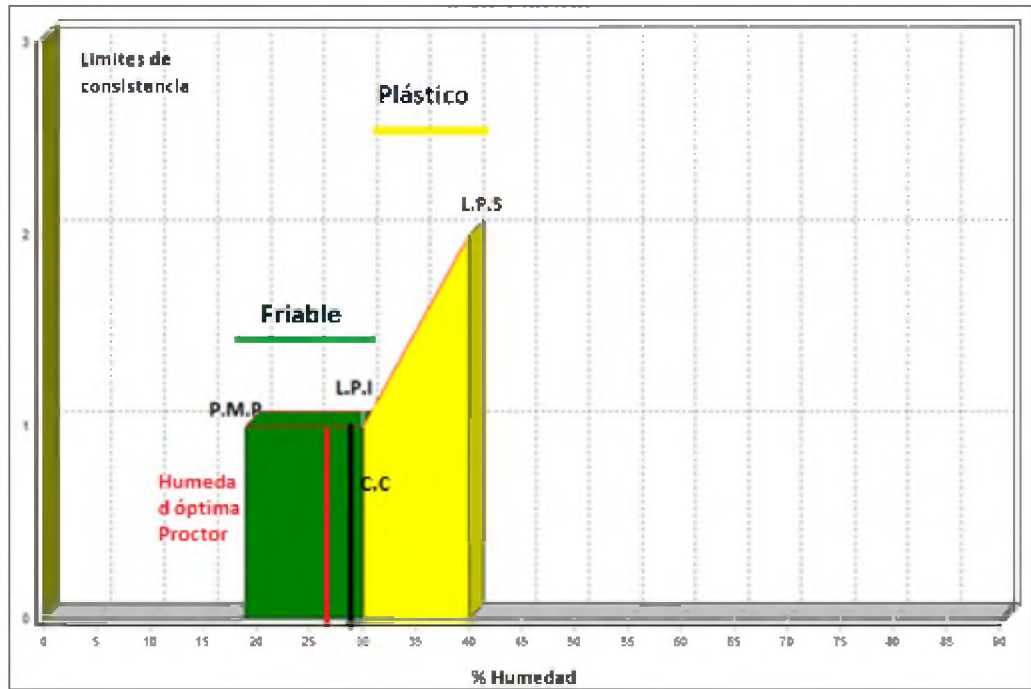


Figura 4.22. Curva de límites de consistencia del Molisol- Parcela 4

El ámbito del estado friable del Vertisol es sumamente reducido (Ver Figura 4.23) ya que va desde 25% a 28% con solo un 3% de variación con cual trabajar. Un aspecto importante que se debe considerar es que la capacidad de campo y la humedad óptima se encuentran en el estado plástico, es decir, para este caso, y para la mayoría de los Vertisoles, no es recomendable trabajar cuando el suelo se encuentra a valores cercanos a la humedad óptima para compactar suelos. Otra importante observación para este caso sería la semejanza de valores de capacidad de campo con la humedad óptima, con solo un 2% de diferencia, siempre siendo mayor el porcentaje de capacidad de campo.

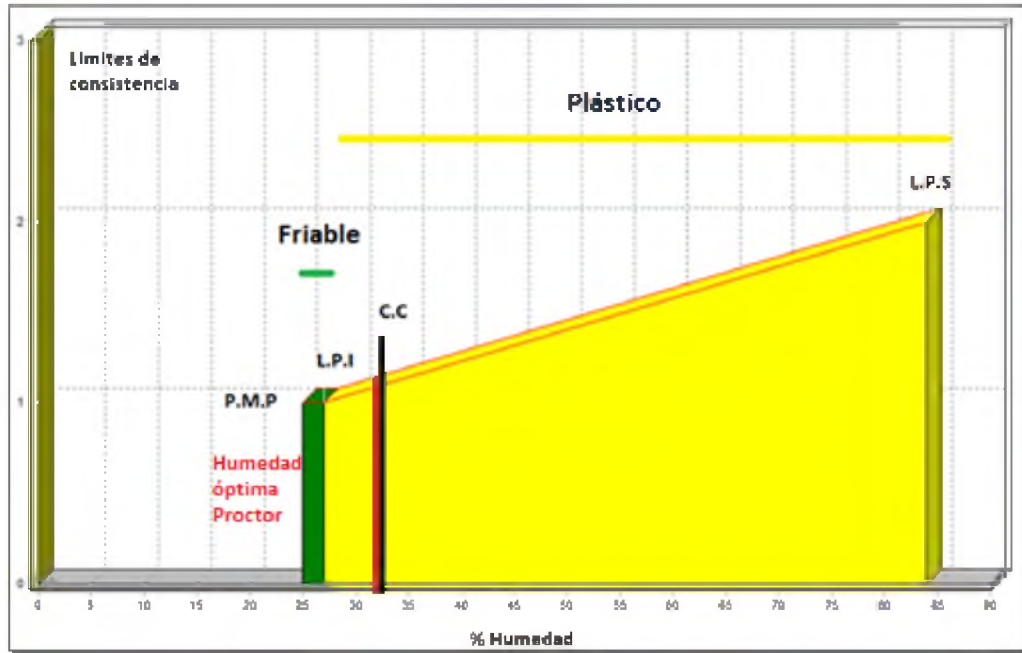


Figura 4.23. Curva de límites de consistencia del Vertisol- Parcela 1

## 5 Capítulo Discusión de Resultados

En este capítulo se inicia con las limitaciones y dificultades encontradas al ejecutar el trabajo. Además se discutirán los resultados obtenidos más relevantes para la investigación realizada.

### 5.1 Limitaciones al aplicar la metodología planteada

1. Una de las importantes limitaciones, pero difícil de impedir, fueron las condiciones del campo en el momento en que se obtuvieron las muestras, ya que se tomaron con porcentajes de contenido de humedad del suelo muy variables, esto debido principalmente a los momentos de riego, ya que en algunas parcelas se presentaba un mal drenaje.

Al variar los contenidos de humedad del suelo, varían también las condiciones del suelo, no permitiendo una comparación directa de los resultados obtenidos. En el caso de las parcelas preparadas para siembra, se realiza el riego al final de la preparación y estando la semilla ya sembrada, por lo que no hubo tanta influencia del riego en este caso, aunque si se presentaron muchas variaciones de humedad, ya que al transcurrir el tiempo el suelo se encontraba cada vez menos húmedo.

Por ejemplo en el caso de la parcela 1 (Suelo Vertisol) al realizar una de las repeticiones de las calicatas después de la cosecha, se encontró con una de las 4 calicatas llena de agua a pesar de que el último riego realizado un mes o hasta dos meses atrás (Figura 5.1), esto se debe principalmente al mal drenaje, acumulándose el agua en un punto bajo del terreno también debido al piso de arado a más de 30 cm que no permite una buena infiltración del agua. En el caso de la parcela 4 (Suelo Molisol) sucedió lo mismo, una calicata llena de agua, pero en diferente momento que la parcela 1, sucedió después del abonado y cultivado, siendo una situación inesperada ya que el riego se había realizado hacia menos de un mes.





Figura 5.1. Calicata llena de agua en Parcela 1 (Vertisol)

2. La otra limitación que se obtuvo en campo fue la toma de datos a 15 cm de resistencia a la penetración y entre 0 y 30 cm de la densidad aparente (utilizando el método del cono de arena) después del subsolado o arado de cincel, ya que este implemento rotura el suelo en los primeros 15 a 20 cm (Figura 5.2). Por lo tanto en el momento de la toma de muestra se encontraban los primeros 15 cm del suelo completamente sueltos y en terrones, por lo que se tuvo que esperar a que se regara la parcela para poder obtener los datos de densidad aparente cuando el suelo se encontrara en condiciones medibles, esto sucedió en el caso de las parcelas con retoño (Parcela 3 y 4).

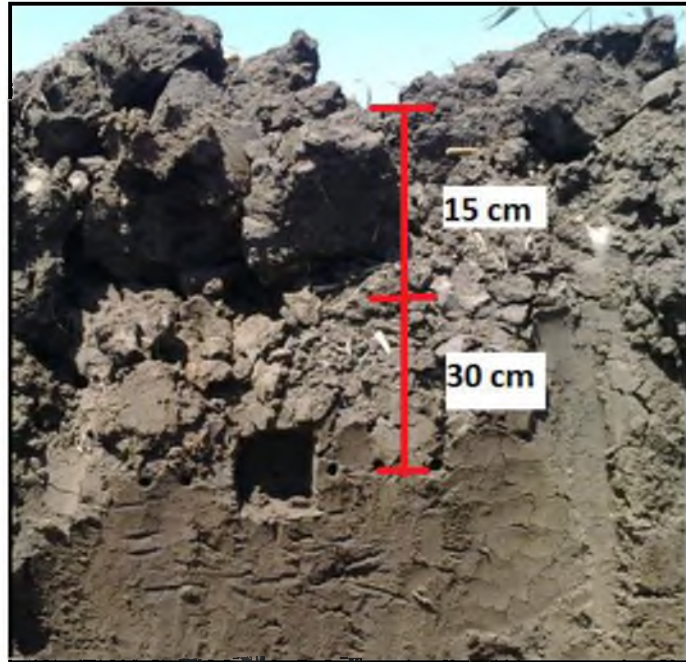


Figura 5.2. Rotura del suelo con el arado del cincel en parcela 3 (Vertisol)

3. Otra limitación fue el supuesto de que el subsolador rotura el suelo hasta una profundidad de 60 cm y el arado de cincel hasta una profundidad de 30 cm, siendo esto base para definir la metodología de dicha investigación. Dichos supuestos no se dieron ya que según lo observado en campo por medio de las calicatas realizadas, el arado de cincel y el subsolador roturaron el suelo no más de 20 cm (Figura 5.3).



Figura 5.3. Rotura del suelo con el arado de cincel en parcela 4 (Molisol)

4. La precisión de la romana ubicada en el Ingenio de Taboga, la cual fue utilizada para pesar toda la maquinaria e implementos utilizados en cada parcela se encontraba con una capa de suelo compacto sobre ella, por lo que disminuye el grado de precisión (Figura 5.4).



Figura 5.4. Romana utilizada para pesar maquinaria

5. Para poder obtener los datos de resistencia a la penetración se tuvieron que realizar calicatas y obtener los datos por medio de pruebas horizontales, ya que al realizar las pruebas verticales preliminares no se pudo introducir el penetrómetro a 60 cm, y en algunos casos ni siquiera el cono del penetrómetro.

Las pruebas horizontales no presentan los mayores resultados de compactación de suelos, esto debido a que el suelo no es isotrópico, en sentido vertical se atraviesan distintas capas de terreno y en sentido horizontal se atraviesa la superficie de cada capa. Según la experiencia en avenamiento al comparar la conductividad hidráulica (flujo de agua horizontal) con la infiltración (flujo de agua vertical, la cual también se utiliza como indicador del grado de compactación), el agua fluye más fácilmente de manera horizontal que vertical, por lo que las pruebas verticales muestran los mayores valores de compactación de suelo. Esto no quiere decir que los datos no son válidos, más bien a pesar de que los datos fueron tomados de manera horizontal se presentaron altos niveles de compactación.

6. Grado de precisión del instrumento para medir resistencia a la penetración también se considera un limitante ya que el aparato tiene una desviación estándar de  $\pm 8\%$  en un rango de 200 – 700 N (zona verde del manómetro). En el rango de 100 a 200 N la desviación es de  $\pm 15\%$ , a pesar de que la larga desviación puede ser evitada eligiendo el cono indicado (ver anexo Figura 8.25). Con dicho aparato no se pueden tomar valores menores de 100 N.
7. En el área agronómica se da una falta de normas, especialmente para ciertos procedimientos de laboratorio, además se debe basar principalmente en valores de investigaciones y no en valores estandarizados, como se da en el área de mecánica de suelos, esto limita a la hora de querer utilizar dichos valores que han sido tomados en diferentes condiciones.

8. Debido a que los valores de resistencia a la penetración deben encontrarse a capacidad de campo para poder comparar entre datos, hubo dificultad para poder utilizar todos los datos tomados y poder realizar el análisis cuantitativo con todos los datos, esto debido a la gran variabilidad de los contenidos de humedad del suelo con rangos desde 9 a 46% para la Parcela 1, de 14% a 62% para la Parcela 2, de 15 a 46% para la Parcela 3, de 8 a 49% para la Parcela 4. Por lo tanto para realizar el análisis cuantitativo hubo que aplicar criterios de selección de datos.

## 5.2 Discusión de Resultados

A continuación se presentan los más relevantes resultados obtenidos más para la investigación realizada.

Para el caso de la Parcela 1 (Vertisol- Siembra) los datos de densidad seca y porcentaje de compactación muestran que el paso del arado no realiza ningún cambio en la estructura del suelo a 30 cm de profundidad y comparando estos datos con la resistencia a la penetración a 30 cm, la cual muestra que el arado influye, pero no rotura, el entresurco disminuyendo 0.20 MPa, se puede concluir que para este suelo no se está realizando correctamente la labor de arado, ya que no se muestra rotura a los 30 cm. A pesar de esto para el caso de las parcelas preparadas para siembra, este suelo presenta mejores resultados con el arado que el Inceptisol. Otra información importante que brinda los datos de resistencia a la penetración es que el piso de arado se encuentra a 60 cm.

La densidad máxima muestra un resultado que es importante destacar, ya que la Parcela 1 es la que presenta menor densidad máxima, siendo más susceptible a compactarse. Además este suelo presenta la mayor humedad óptima, lo cual permite que también tenga las menores densidades aparentes, ya que es menos probable que el suelo llegue a una humedad de 32%.

Una situación importante por recalcar en este tipo de suelo es que para el caso de porcentajes de compactación todos los valores en cada momento son menores a los críticos, sucediendo lo mismo para el caso de los datos de resistencia a la penetración, ya que los valores no se encuentran cercanos al crítico.

En el caso de la Parcela 2 sucede una contradicción de los resultados de porcentaje de compactación al mostrar un aumento del porcentaje después del arado, siendo el implemento que produce menor carga (junto con el tractor) en esta parcela, en cambio en el resultado de resistencia a la penetración se muestra una disminución considerable después del arado. Pero cabe recordar que el valor crítico de resistencia a la penetración es tomado de investigaciones realizadas para varios cultivos, no es específicamente para la caña de azúcar. Además ambos datos muestran resultados con diferentes objetivos, ya que el objetivo del porcentaje de compactación es mostrar que tan compactado se encuentra el suelo para funcionar como rellenos y soporte de futuras carreteras y edificaciones. En cambio la resistencia a la penetración muestra cuanto puede penetrar la raíz al suelo dependiendo de la resistencia que tenga el suelo.

Los resultados de resistencia a la penetración muestran que el piso de arado para la Parcela 2 se encuentra a 60 cm. Además este suelo presenta la mayor densidad máxima ( $1.44 \text{ g/cm}^3$ ), siendo menos susceptible a sufrir compactación, aunque a pesar de esto los valores de densidad aparente en todos los momentos se encuentran cercanos a la densidad máxima.

En la Parcela 3 sucede lo mismo que la Parcela 2, al haber una contradicción con los resultados de porcentaje de compactación y resistencia a la penetración, ya que según los resultados de porcentaje de compactación los valores se encuentran a porcentajes de compactación muy altos, cercanos a los utilizados para relleno. Además los resultados de densidad aparente muestran que este suelo tiene el valor más cercano para llegar a densidad máxima. En cambio los resultados de resistencia a la penetración muestran valores menores a los críticos.

En cuanto al arado según los resultados de resistencia a la penetración y densidad aparente se da una leve disminución después del paso de este. Y debido a que los valores de resistencia a la penetración a 60 cm son los más bajos, se podría decir que el piso de arado se encuentra a 30 cm.

La Parcela 4 presenta los valores más altos en cuanto a resistencia a la penetración, especialmente después del paso de la cosechadora de caña de azúcar, y esto coincide con los resultados de porcentaje de compactación. Además se corrobora con los valores de densidad aparente, los cuales se encuentran muy cercanos a la densidad máxima. Por lo tanto según las tres metodologías y sus resultados este suelo Molisol es el que se encuentra con mayor grado de compactación en todos los momentos.

En cuanto al arado según los resultados de resistencia a la penetración a los 15 cm no hubo rotura del suelo, caso contrario sucede con los resultados de porcentaje de compactación y densidad aparente, los cuales muestran una significativa disminución con el paso del arado. Igualmente sucede con el paso del fertilizante ya que los datos de resistencia a la penetración muestran una disminución y la densidad aparente muestra un aumento después del abonado.

## 6 Capítulo Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

- Los factores críticos que producen la compactación de suelos en el Ingenio de Taboga, asociado al cultivo de caña de azúcar se deben principalmente a la maquinaria utilizada para realizar las labores en campo, especialmente la cosechadora de la caña de azúcar, las carretas autovolteo y las carretas que trasladan la semilla para la siembra del cultivo.
- Al cuantificar los efectos de la maquinaria en la compactación de suelos, utilizando las técnicas de mecánica de suelos utilizadas en compactación para rellenos, se logro observar dos aspectos importantes: el primero es que se está utilizando la

misma maquinaria sin importar el tipo de suelo en el que se está trabajando y el segundo aspecto es que se está utilizando maquinaria muy pesada que sobrepasa los puntos de precompactación de los suelos, provocando fácilmente la falla de los mismos.

- Al cuantificar los efectos de la maquinaria en la descompactación de suelos, utilizando las técnicas de mecánica de suelos, se concluye que el objetivo del subsolado o arado no se está cumpliendo en ninguno de los tres tipos de suelos, ya que se produce una rotura no mayor de 20 cm y según los resultados el piso de arado se encuentra a los 30 cm o más.
- Se recomiendan utilizar técnicas de Densidad Aparente, Resistencia a la Penetración y la de Corte con Veleta para cuantificar los grados de compactación. No se puede establecer un procedimiento ya que no se realizó el estudio para poder conocer los valores críticos para cada una de las técnicas, en el caso de densidad aparente y resistencia a la penetración no se investigó el valor crítico que afecta el desarrollo de las raíces y para el caso del ensayo de corte con veleta no se pudo conocer el valor crítico de la resistencia cortante del suelo ya que los resultados parecen indicar que el subsolado o arado lejos de descompactar se encontraba compactando. Por tanto no fue posible determinar una metodología para poder saber cuándo y cuánto descompactar. Para poder realizar esta metodología es necesario solucionar tal limitación encontrada (el subsolador y el arado no están laborando a profundidades de 50- 60 cm), ya que no se está cumpliendo el objetivo de descompactar el suelo.

## 6.2 Recomendaciones

1. Se recomienda realizar un análisis de corte del suelo antes de subsolar o arar y para poder correlacionar la resistencia a la cortadura del suelo con el subsolado, ya que el análisis de corte brinda información de la resistencia interna máxima del suelo al movimiento de sus partículas, además dicho análisis podría indicar directamente el efecto que produce la aradura.



2. En cuanto al arado y subsolado es recomendable adicionar peso en el implemento hasta lograr obtener la profundidad deseada, ya que al pesar dicho implemento se percibe poco peso y se observó poca profundidad al trabajar.
3. Una de las razones para utilizar el subsolador o arado de cincel para el caso de la caña de azúcar, aparte de descompactar, es promover la infiltración del agua de riego y eliminar los insectos que viven en la capa superficial, permitiendo la entrada del sol. Esto se convierte en un inconveniente ya que se está utilizando maquinaria pesada para realizar dicha labor produciendo mayor compactación en lugar de descompactación. Por lo que se recomienda realizar, en un área experimental, unas pruebas en las cuales se realice cada 2 años la labor de arado y así validar si el paso del arado anual es verdaderamente efectivo.
4. Se recomienda utilizar el subsolador a una profundidad de 60 cm durante la preparación de suelos para evitar el piso de arado y descompactar el suelo para un buen desarrollo de las raíces del cultivo, tal y como lo recomienda MAG (1991) y de la Universidad Estatal de Michigan, Harrigan, (2011).
5. Reincorporar el material vegetativo de los desechos de la cosecha de la caña de azúcar en lugar de quemarlos, ya que al permitir la acumulación de biomasa se favorece la fijación del N, se eliminan las semillas no deseadas y mejora la estructura del suelo (Augstburger et al, 2000) disminuyendo la resistencia mecánica (Baver et al ,1972) y produciendo agregados más estables y fuertes que resisten la compactación (Daum, 1996).
6. Rotar con cultivos que mejoran la estructura del suelo y la diversidad biológica (McKenzie, 2010), utilizando las raíces de plantas como herramienta de labranza, ya que las raíces dejan canales que mejoran el movimiento del agua y la difusión gaseosa a través del suelo ofreciendo una solución práctica a la compactación de suelos (Elkins, 1985).

7. Se recomienda minimizar pasadas de la maquinaria en el área donde se encuentra el cultivo. Esto se puede realizar utilizando el sistema de tráfico controlado asegurándose que todo el equipo cubra la misma distancia de siembra del cultivo y minimizando el número de vías de tráfico (USDA, 2003). Otra opción puede ser el sistema de labranza de conservación el cual reduce las operaciones de labranza, realizando solamente las operaciones necesarias (Raper, 2006).
8. Para una investigación futura con el fin de identificar cual es la maquinaria que está produciendo mayor grado de compactación se pueden utilizar los métodos de mecánica de suelos para calcular la energía que se aplica en campo, tomando en cuenta las pasadas de la maquinaria y sus pesos correspondientes. Por lo tanto utilizando las metodologías de compactación de suelos, se puede realizar una comparación de la energía que se aplica en campo contra la energía utilizada para compactar suelos.
9. Es recomendable realizar una futura investigación en la cual se relaciona la productividad por hectárea con la compactación de suelos a través del tiempo, es importante observar dicha relación desde que se realiza la preparación de suelos para siembra hasta que se renueve dicha siembra (5 años después).
10. Es de suma importancia analizar el desarrollo de las raíces en las condiciones en las que se encuentra el suelo en campo y así corroborar la resistencia a la penetración que se considera crítica para la caña de azúcar en los suelos con dicho cultivo.
11. Así como existe la relación de resistencia suelo/suelo y suelo/metal por medio de la ecuación teórica de Coulomb, se podría obtener la relación de resistencia suelo/raíz, siendo una información muy útil a la hora de analizar la resistencia a la penetración de la raíz en el suelo.
12. La Capacidad de Soporte del Suelo (CBR) provee una medición de la resistencia a la penetración del suelo a poca profundidad (usualmente

0.254 cm), expresado como una relación de la resistencia a la penetración de un material estándar bajo las mismas condiciones de prueba. Dicha prueba se desarrollo para el análisis de carreteras principalmente, siendo una prueba pesada. Sin embargo, se podría desarrollar una metodología adaptada para suelos en rangos de menor resistencia a la penetración, similares, pero con equipos menos pesados utilizados para las labores agrícolas (ASAE, 1971).

## 7 Bibliografía

Universidad Católica de Valparaíso. (2003). *Escuela de Ingeniería en Construcción*. Recuperado el 21 de 07 de 2011, de Clasificación de Suelos: [http://icc.ucv.cl/geotecnia/03\\_docencia/03\\_clases\\_catedra/clases\\_catedra\\_ms1/05\\_terzaghi\\_3.pdf](http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/03_clases_catedra/clases_catedra_ms1/05_terzaghi_3.pdf)

AASHTO. (2003). *The California Bearing Ratio: T 193-99*. AASHTO.

Agüero, J. (1983). Compaction and compactness of agricultural and livestock soils. *Costarican Agronomy, Vol 7* , 27-33.

ASAE. (1971). *Compaction of Agricultural Soils*. Michigan: ASAE.

Ashburner, J., & Sims, B. (1984). *Elementos de Diseño del Tractor y Herramientas de Labranza*. San José. Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

Atterberg, A. (1911). *Die Plastizität der Tone*. Int. Mitt. Bodenk.

Augstburger, F., Berger, J., Censkowsky, U., Heid, P., Milz, J., & Streit, C. (2000). Organic Production of sugarcane. En *Naturland, Organic agriculture in the tropic and subtropic*. Germany: Naturland Asoc.

Bailey, A., Raper, R., Burt, T., Way, R., & Johnson, C. (1996). Soil stresses under a tractor tire at various loads and infiltration pressures. *J. Terra* , 33: 1-11.

Bakker, H. (1999). *Sugar cane cultivation and managment*. United Kingdom: Kluwer academic/ Plenum publishers.

Bandalan, E., Salokhe, V., Gupta, C., & Niyamapa, T. (1999). Performance of an oscillating subsoiler in breaking hardpan. *Journal Terramechanics* , 36: 117-125.

Barley, K. (1954). Effect of root growth and decay on the permeability of a synthetic sandy loam. *Soil Sci* 78 , 205-211.

Barzegar, A., Assodar, M., & Ansari, M. (2000). Effectiveness of sugarcane residues incorporation at different water contents and the Proctor compaction loads in reducing soil compatibility. *Soil Tillage Res* , 57: 167-172.

Baver, L., Gardner, W., & Gardner, W. (1972). *Física de suelos*. México: Centro Regional de Ayuda Técnica.

Baver, L., Gardner, W., & Gardner, W. (1972). *Soil physical*. México: Centro Regional de Ayuda Técnica.

Beata, H. (26 de 10 de 2010). *European Comission*. Recuperado el 27 de 11 de 2011, de Land Managment and Natural Hazards Units: <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/library/themes/compaction/>

Bedard, Y., Tessier, S., Lague, C., Chen, Y., & Chi, L. (1997). Soil compaction by manure spreaders equipped with standard and oversized tires and multiple axles. *ASAE* , 40: 37-43.

Bell, M., Halpin, N., Orange, D., & Haines, M. (2001). Effect of compaction and trash blanketing on rainfall infiltration in sugarcane soils. *Proc. Aust. Soc. Sugarcane Technology* , 23: 161-167.

Bouyoucos, G. (1962). *Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil*. *Agronomy J.*

Bowen, H. (1981). Alleviating mechanical impedance. In *Modifying the root enviroment to reduce crops stress*. *ASAE* , 21-57.

Brady, N., & Weil, R. (2008). Soil Water: Characteristics and behavior. En *The nature and properties of soils* (págs. 177-217). New Jersey: The Macmillan Company.

Braunack, M., & Hurney, A. (2000). The position of harvesting traffic does afect yield. *Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Tech* , 22: 126-132.

Camargo, O. A., & Alleoni, L. R. (1997). *Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas*. Piracicaba: Degaspar.

Cerana, J., Wilson, M., Pozzolo, O., De Battista, J., Rivarola, S., & Diaz, E. (2005). Relaciones matemáticas entre la resistencia mecánica a la penetración y el contenido hidrícola en un vertisol. *Estudios de la zona no saturada del suelo* .

- Chen, G., & Weil, R. (2009). Penetration of cover crop roots through compacted soils. *Department of Environmental Science and Technology, University of Maryland* .
- Daddow, R., & Warrington, G. (1983). *Growth Limiting Soil Bulk Densities as Influenced by Soil Texture*. Colorado: USDA.
- Daum, R. (1996). Soil Compaction and Conservation Tillage. *Pennsylvania State University* .
- Day, P. (1965). *Particle fractionation and particle size analysis*. Madison Wisconsin: Agronomy 9. Society of Agriculture Incorporation.
- El Titi, A. (2003). *Soil Tillage in agroecosystems*. United States: CRC Press.
- Elkins, C. (1985). Plant roots as tillage tools. *International Conference on Soil Dynamics*, (págs. 519-523). Auburn.
- Eriksson, J., Hakansson, I., & Danfors, B. (1974). The effect of soil sompaction on soil structure and crop yields. *Swegich Institute of Agricultural Engineering* , Bulletin 354.
- Espinosa, R. (1980). Efectos de diferentes combinaciones de aperos de preparación de suelo sobre los rendimientos de la caña de azúcar. *Rev Cultivos Tropicales* , Vol 2(3) 57-91.
- Fernández, R., Dávila, A., & Del Toro, F. (1983). *Botany and physiology*. Editorial Pueblo y Educación.
- Forsythe, W. (1985). *Física de suelos: Manual de laboratorio*. San Jose, Costa Rica: IICA.
- Forsythe, W. (2006). *La compactación del suelo y el cultivo de la caña de azúcar*. San José, Costa Rica: Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica.
- García, J. R., Sosa, F., & Fernández, J. *El Agua del Suelo*. Tucumán: Universidad Nacional de Tucumán.
- Gavande, S. (1972). *Física de suelos. Principios y Aplicaciones*. México: Limusa-Wiley S.A.
- Gavande, S. (1972). *Soil phisycal.Principles and applications*. México: Limusa-Wiley S.A.
- Gill, W. (1971). Economic assessment of soil compaction. *ASAE* .

Harrigan, T. (Compositor). (2011). *Alleviating Soil Compaction*. East Lansing, Michigan, USA.

Harris, W. (1971). The soil compaction process. *Compaction in Agricultural Soils* , págs. 9-46.

Hartage, K. H., & Horn, R. (1989). Bestimmung des Drucksetzungsverhalten. En K. H. Hartage, & R. Horn, *Die physikalische untersuchung vom boden* (págs. 68-77). Stuttgart: Emtce.

Henríquez, C., & Cabalceta, G. (1999). *Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola*. San José, Costa Rica: ACCS.

Henríquez, C., Cabalceta, G., Bertsch, F., & Alvarado, A. (29 de 01 de 2012). *Ministerio de Agricultura y Ganadería*. Obtenido de Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo: [http://www.mag.go.cr/biblioteca\\_virtual\\_ciencia/suelos-cr.html](http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/suelos-cr.html)

Hernández, G. (2005). *Mapa Climatológico de Costa Rica*. Recuperado el 30 de Julio de 2011, de Escuela de Ciencias Geográficas, Universidad Nacional: <http://www.mapoteca.geo.una.ac.cr/>

Hernández, J. C. (2008). *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.

Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics*. California: Academic Press.

Kay, B. (1990). Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Advances in Soil Science, Vol 12* , p. 1-52.

Lal, R. (1996). Axle load and tillage effects on soil degradation and rehabilitation in Western Nigeria. *Land degradation review* , 7: 19-45.

MAG. (1991). *Aspectos técnicos de 45 cultivos de Costa Rica*. San Jose, Costa Rica: Dirección General de Investigación y Extensión Agrícola.

Magdoff, F. (2000). *Building Soils for Better Crops*. U.S.: Sustainable Agriculture Network.

McGarry, D., & Bristow, K. (2001). Sugarcane production and soil physical decline. *Proc. Int. Soc. Sugarcane Technol* , 24: 3-7.

McKenzie, R. (October de 2010). *Government of Alberta*. Recuperado el 11 de November de 2011, de Agricultural and Rural Development: [http://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/all/agdex13331](http://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/agdex13331)

Mich, J. (1999). Terminology and definitions for soil tillage and soil-tool relationships. *ASAE Standards* .

Micklethwaite, E. (1944). *Soil mechanics in relation to fighting vehicles*. Chertesy, England: Military College of Science.

Muturi, S., Omollo, J., & Kariuki, K. (2008). Investigation of possibility to reduce tillage depth and cost without reducing cane yield in the Nyando sugar belt, Western Kenya. *Kenya Sugar Research Foundation* , 725-731.

Naseri, A., Jafari, S., & Alimohammadi, M. (2007). Soil compactio due to sugarcane mechanical harvesting and the effects of subsoiling on the improvment of soil physical properties. *Journal of applied sciences* , 7 (23): 3639-3648.

Núñez Solís, J. (2000). *Fundamentos de edafología*. San Jose, Costa Rica: EUNED.

Petersen, M., Ayers, P., & Westfall, D. (1996). Managing soil compaction. *Colorado State University, Cooperative entension* , no.0.519.

Potter, K., & Chichester, W. (1993). Physical and chemical properties of a vertisol with controlled traffic, no-till managment. *ASAE* , 36: 95-99.

Radulovich, R. (2009). *Conceptos de física y manejo de suelos*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

Raghavan, G., Alvo, P., & McKeys, E. (1990). Soil compaction in agriculture: A view toward managing the problem. *Advances in soil science, Vol. 11* , 1-35.

Rangeon, N., Aciar, L., Osinaga, R., Arzeno, J., & Sánchez, C. (2008). Análisis de la resistencia a la penetración y humedad del suelo como indicadores de la calidad en



distintos sistemas de labranza. *XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Potrero de los Funes, Argentina: Asociación Argentina Ciencia del Suelo.

Raper, R., & Mac Kirby, J. (2006). Soil compaction: how to do it, undo it and avoid doing it. *ASABE #30*, 1-14.

Richard, G., Cousin, I., Sillon, J., Bruand, A., & Guérif, J. (2001). Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, 49-58.

Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). *Propiedades Físicas del Suelo*. Montevideo, Uruguay: Universidad de la República.

Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). *Soil physical properties*. Montevideo, Uruguay: Universidad de la República.

Silva, A. (2011). *La materia orgánica del suelo*. Recuperado el 2012, de Biblioteca Facultad de Agronomía, Universidad de la República de Uruguay: <http://bibliofagro.pbworks.com/f/materia%2Borganica%2Bdel%2Bsuelo.pdf>

Sloene, B., & Ouwerkerk, V. (1994). Soil compaction in crop production. En B. Kayombo, & R. Lal, *Response of tropical crops to soil compaction* (págs. 287-315). Amsterdam: Elsevier.

Söhne, W. (1958). Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. *Agricultural Engineering*, 39: 276-290.

Soil Survey Staff. (1993). *Soil Survey Manual*. Washington: USDA.

Sowers, G. B., & Sowers, G. F. (1972). *Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones*. Limusa.

Subirós, F. (2000). *El cultivo de la caña de azúcar*. San José, Costa Rica: EUNED.

Taylor, J., Burt, E., & Bailey, A. (1980). Effect of total load on subsurface soil compaction. *ASAE*, 23: 568-570.

Thomas, G. W., Haszler, G. R., & Blevins, R. L. (1996). The effects of organic matter and tillage on maximum compactability of soils using proctor test. *Soil science* , 502-507.

Thompson, L. M., & Troeh, F. R. (2002). *Soils and Fertility*. New York, USA: McGraw-Hill Book Company.

University of Idaho, C. o. (29 de 01 de 2012). Mollisol. Idaho, United States.

*University of Minnesota Extension*. (2001). Recuperado el 14 de 11 de 2011, de Soil compaction: causes, efect and control: <http://www.extension.umn.edu/distribution/cropsystems/components/3115s01.html>

USDA. (2010). *Claves para la Taxonomía de Suelos*. Estados Unidos: USDA.

USDA. (2003). Soil compaction. Detection, Prevention and Alleviation. *Soil Quality Institute. Agronomy Technical Note* , No 17.

USDA. (2008). *Soil quality indicators: Bulk density*. Natural Resources Conservation Services.

USDA.NRCS. (1996). *United States Department of Agriculture*. Recuperado el 10 de 4 de 2012, de Natural Resources conservation: [http://soils.usda.gov/sqi/publications/files/sq\\_nin\\_1.pdf](http://soils.usda.gov/sqi/publications/files/sq_nin_1.pdf)

Valerio, O. (Febrero de 2011). Densidad seca "in situ". (M. Rojas, Entrevistador)

Voorhees, W., & Lindstrom, M. (1984). Long-term effects of tillage method on soil tilth independent or wheel traffic compaction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48 , 152-156.

Xu, D., & Mermoud, A. (2001). Topsoil properties as affected by tillage practices in North China. *Soil Till Res.* 60 , 11-19.

## 8 Anexo

### 8.1 Física de suelos

La definición del suelo, desde el punto de vista físico, según Gavande (1972), se considera como un sistema de gran complejidad, heterogeneo, disperso y trifasico (sólido, líquido y gaseoso).

La fase sólida puede ser mineral u orgánica. La porción mineral consiste en partículas de varios tamaños, formas y composiciones químicas. La porción orgánica incluye residuos en diferentes etapas de descomposición y organismos de vida activa. La fase líquida es el agua del suelo que llena una parte o la totalidad de los espacios vacíos entre las partículas sólidas y que varía en su composición química y en la libertad con que se mueve. La fase gaseosa ocupa el espacio de poros entre las partículas del suelo que no está llena de agua. (Richard et al, 2001)

La física de suelos es el estudio de grupos de factores y procesos físicos que tienen lugar dentro del suelo y en su superficie (Gavande et al, 1972), como lo es la textura, estructura, densidad, consistencia y retención de agua de los suelos. Las prácticas de labranza influyen en todas las condiciones físicas del suelo, especialmente cuando estas son excesivas, provocando erosión, compactación, pérdida de humedad del suelo, mala estructura y deterioro de otras características físicas del suelo que impiden el desarrollo radicular.

#### 8.1.1 Textura de los suelos

La textura del suelo está relacionada con el tamaño de las partículas minerales y se refiere a la proporción relativa de arena, limo y arcilla dentro del suelo. La textura del suelo es una característica en extremo importante, la cual afecta las propiedades físicas, químicas y biológicas. (Gavande et al, 1972)

La composición por tamaño de las partículas (granulométrica) de un suelo, es el porcentaje de materia mineral en peso de cada fracción, obtenida por separación de las

partículas minerales en dos o más clases por tamaño mutuamente excluyentes. (Rucks et al, 2004)

Estas fracciones como es de suponerse, se han propuesto diferentes clasificaciones, en el Cuadro 8.1 se presenta uno de los más importantes: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA).

Cuadro 8.1 Clasificación de las partículas del suelo según el USDA

<b>Fracción del suelo</b>	<b>Diámetros (mm)</b>
Arena muy gruesa	2.00 - 1.00
Arena gruesa	1.00 – 0.50
Arena media	0.50 – 0.25
Arena fina	0.25 – 0.10
Arena muy fina	0.10 – 0.05
Limos	0.05 – 0.002
Arcilla	Menor de 0.002

El procedimiento analítico para realizar esta clasificación se llama granulométrico, el cual es una determinación de la distribución de los tamaños de partículas.

Existen varios métodos para hacer un análisis granulométrico, pero solamente han sido los más comúnmente aceptados: El método de la pipeta y el método del hidrómetro (de Bouyucos y el modificado por Day) (Gavande et al, 1972). Ambos métodos de análisis están basados en el hecho de que la velocidad de caída de las partículas del suelo a través del agua aumenta con el diámetro de las mismas, o en una combinación de esta propiedad con el uso de tamices para separar las partículas gruesas (Rucks et al, 2004).

Las partículas suspendidas en el agua se asientan diferencialmente, dependiendo de la cantidad de superficie por unidad de volumen. Las partículas de arcilla tienen una gran área superficial por unidad de volumen y se asienta lentamente, mientras las

partículas de arena se asientan rápidamente debido a su baja superficie específica. De esta manera se logra determinar el porcentaje de arena, limo y arcilla. (Gavande et al, 1972)

***Método del hidrómetro:***

La cantidad de partículas en suspensión es determinada usando un hidrómetro para medir la densidad de la suspensión. En el método de Bouyoucos (1962) se toman dos lecturas: la primera a los 40 segundos, ya que en este lapso de tiempo todas las partículas mayores de 0.05 mm de diámetro se han asentado, de manera que no tendrán alguna influencia sobre el hidrómetro. La segunda se realiza dos horas después de haber tomado la primera lectura, debido a que se habrán asentado las partículas de más de 2 micras de la solución (Gavande et al, 1972). Este es un método calibrado y no sigue la ley de Stokes, a diferencia del de Day (1965), que si la considera y ayuda a determinar la distribución de las partículas en la suspensión del suelo por el método del hidrómetro y lo hace más correcto y exacto científicamente. Se realizan mediciones a 2, 5, 15, 30, 60, 250 y 1440 min. Por lo cual esta es una explicación del porque de los distintos números y tiempos de lecturas.

Cuando se conoce los porcentajes de arena, limo y arcilla, el nombre de la clase textural se determina fácilmente con el uso del triángulo de texturas (Figura 8.1), el cual es un método exacto y fundamental dado por el USDA.

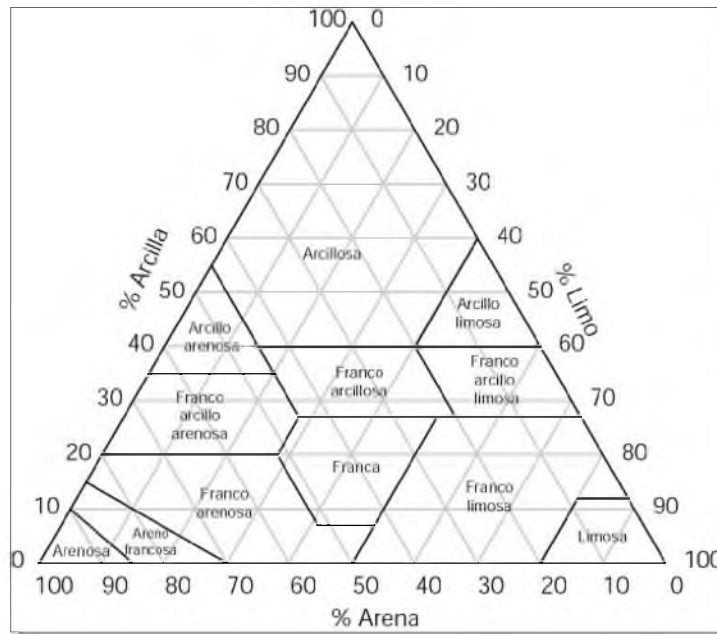


Figura 8.1 Triángulo textural según la clasificación del USDA

### 8.1.1.1 Naturaleza física de las fracciones del suelo

Las fracciones gruesas, arena y grava, cuando no están cubiertas de arcilla y limo carecen prácticamente de plasticidad y de tenacidad. Su capacidad de retener agua es escasa y el paso del agua gravitacional es rápido debido a los grandes espacios entre sus partículas separadas, facilitando así el drenaje y el eficaz movimiento del aire. Los suelos en los que predominan la arena o la grava, debido a esto, son de carácter abierto poseen un buen drenaje y aireación y no ofrecen resistencia al laboreo. (Rucks et al, 2004)

Las partículas de arcilla normalmente son laminares y si se humedecen son muy plásticas. Cuando se humedece la arcilla con una cantidad adecuada de agua, se expande y se vuelve pegajosa. (Rucks et al, 2004)

Las partículas de limo tienden a ser irregulares, distintas en forma y raras veces lisas o pulidas. La fracción limo posee alguna plasticidad, cohesión y adsorción debido a una película de arcilla que recubre las partículas de la fracción, pero en mucho menor grado que la propia fracción de arcilla. (Rucks et al, 2004)

La dominancia de fracciones finas en un suelo, le determina una textura que tiende a retardar el movimiento del agua y aire. Un suelo así será altamente plástico y

fuertemente adhesivo cuando esté demasiado húmedo, y será pesado y convertido en terrones al secarse, a menos que se trabaje adecuadamente. La expansión y contracción suele ser grande, al mojarse y secarse alternativamente, y la capacidad de retener agua de los suelos de textura fina es alta en general. Como acaba de decirse tales suelos se llaman pesados por sus cualidades de difícil laboreo, en contraste marcado con los livianos, de fácil laboreo, los suelos arenosos. (Rucks et al, 2004)

### 8.1.2 Estructura de los suelos

Según Gavande (1972) , la estructura del suelo se define como la disposición de las partículas elementales (arena, limo y arcilla) que forman partículas compuestas (agregado o unidad estructural), separadas de las contiguas, y que tiene propiedades diferentes de las de una masa igual de partículas elementales sin agregación.

Es importante, para este caso, conocer los efectos de la estructura del suelo en el crecimiento de las plantas, a pesar de no ser directamente sino a través de uno de los cuatro factores siguientes: aeración, compactación, relaciones de agua y temperatura. (Gavande et al, 1972).

Las raíces penetran más fácilmente y con mayor rapidez en los suelos compuestos de agregados estables, de unos 2 a 6 mm de diámetro , que en el mismo suelo molido finamente (Gavande et al, 1972).

Se cree que la compactación del suelo puede tener efectos adversos en plantas que crecen en él, de estas dos maneras: a) por aumentar el impedimento mecánico al crecimiento de las raíces b) por alterar la extensión y la configuración de espacio poroso (Gavande et al, 1972).

En la Figura 8.2, se presenta un esquema de los efectos de la compactación en la estructura de suelo. En el lado izquierdo, el suelo se presenta bien estructurado conservando el espacio poroso y propiedades naturales. Del lado derecho se perdió la estructura por compactación. El suelo pierde profundidad por compactación y erosión. (Baver et al,1972)

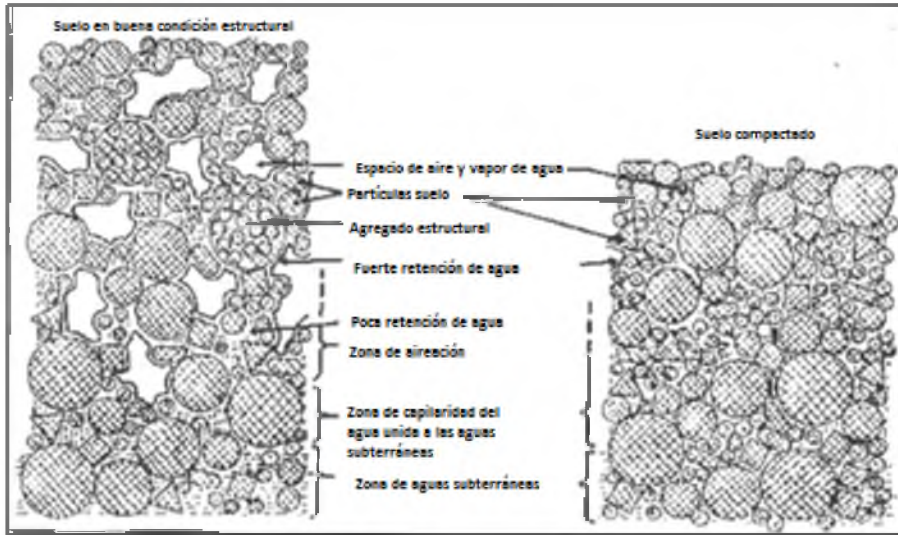


Figura 8.2 Efectos de la compactación en la estructura del suelo

Fuente: Rucks (2004)

Según Gavande (1972), algunos de los factores importantes que afectan la formación de los agregados son los siguientes:

- Arcilla: Entre más arcilla haya en un suelo se tendrá mayor número de agregados puesto que une a las demás partículas de tamaños mayores para formar agregados. La formación de agregados estables no se realiza en arenas y limos en ausencia de coloides. El efecto agregante de la arcilla se debe a su acción cementante y a su propiedad de hinchamiento y contracción con los cambios de humedad.
- Aire: su función es formar la estructura al crear tensión superficial y debido a la expansión que sufre al humedecerse una masa de suelo.
- Temperatura: los efectos son indirectos, ya que:
  - a) induce el movimiento del vapor de agua.
  - b) afecta la velocidad de las reacciones y por lo tanto la descomposición de la materia orgánica.
  - c) afecta la actividad de las plantas y los microorganismos.
  - d) influencia en la formación del tipo y cantidad de arcilla.



- Presión: Cuando se ejercen presiones sobre una masa de suelo húmedo las partículas de arcilla se orientan y permanecen juntas por atracción molecular y debido a fuerzas provocadas por la película de agua. Estas presiones se ejercen por humedecimiento y secado, causando hinchamiento y contracción.
- Agua: esta participa en varias formas en la formación de la estructura, se presentan algunas a continuación:
  - a) Hinchamiento y contracción de los coloides. Los planos de rompimiento debido a la eliminación del agua son principalmente en sentido vertical. Estaciones muy secas causan formación de agregados en el subsuelo.
  - b) La tensión superficial que resulta de la presencia de superficies de agua y aire, mantiene a las partículas juntas y orientadas (cohesión); por otro lado la tensión superficial hace que el agua penetre en los poros llenos de aire, esto hace que el aire retenido en dichos poros escape bruscamente, lográndose así que esta salida cause rompimiento de los terrones. De esta forma un suelo de estructura masiva se rompe en agregados más pequeños.

Según Gavande (1972) la calidad de los agregados se puede expresar en términos de:

- Porosidad: una estructura pobre se trata de un arreglo de los agregados con un espacio poroso total pequeño (40 % solamente) y con poros pequeños que no se drenan bien, de manera que únicamente una pequeña porción está ocupada por aire (5% del volumen del suelo a C.C). Además, las estructuras pobres que interfieren con el crecimiento de las raíces son del tamaño de las arenas finas o limos, lo que ocasiona una compactación del suelo.
- Agregación: Los agregados del suelo deben tener un arreglo tal que permitan una buena distribución de poros y deben ser lo suficientemente estables para retener su identidad. La mejor estructura para el crecimiento

de las plantas es la que permita una capacidad de infiltración grande y de percolación media, lo suficientemente coherente para dar a las raíces soporte adecuado, pero sin ser tan densa que impida su desarrollo.

### 8.1.3 Propiedades dinámicas de los suelos

*“Las propiedades dinámicas de los suelos se refieren al comportamiento del suelo frente a un esfuerzo aplicado y se expresan en movimientos que resultan de fuerzas externas aplicadas al suelo”.* (Baver et al, 1972)

#### 8.1.3.1 Consistencia del suelo

El suelo tiene una cierta consistencia cuando en el sistema suelo-agua, la concentración de suelo se hace grande para que la masa no fluya libremente y entren en juego las fuerzas de adhesión y cohesión. (Baver et al, 1972)

Según Baver, et al (1972) las manifestaciones de las fuerzas de adhesión y cohesión que se causan en el suelo a diferentes constantes de humedad son el comportamiento ante la gravedad, la presión, el empuje y la tracción, y la tendencia de la masa del suelo para adherirse a cuerpos extraños.

Por lo tanto la consistencia del suelo es usualmente definida como el término que designa las manifestaciones de las fuerzas físicas de cohesión y adhesión, actuando dentro del suelo a varios contenidos de humedad (Rucks et al, 2004).

Debido a que los suelos muestran comportamientos distintos a diferentes contenidos de humedad Atterberg fue uno de los primeros en describir los cambios de consistencia con la humedad del siguiente modo:

*“Cuando mezclamos polvo de arcilla con mucha agua, obtenemos una pasta arcillosa fluida. Con menos agua la pasta fluye pero es más densa. Evaporando el agua, la arcilla pasa gradualmente a una masa pegajosa (se pega a los dedos, madera o metales). Luego desaparece la pegajosidad, y la arcilla puede ser fácilmente moldeada sin pegarse a*

los dedos, este es el denominado estado plástico. Con un desecamiento aún mayor, la masa de suelo puede desmenuzarse, y los pedazos pueden ser unidos nuevamente bajo presión considerable (friable). Finalmente se pierde incluso esta condición (masa dura y rígida)". (Atterberg, 1911)

A bajo contenido de humedad el suelo es duro y muy coherente a causa del efecto de cementación entre partículas secas. Si el suelo es trabajado con estas condiciones se producen terrones. Cuando el contenido de humedad aumenta, son adsorbidas moléculas de H<sub>2</sub>O, sobre la superficie, lo cual decrece la coherencia e imparte friabilidad a la masa del suelo.

Esta zona de consistencia friable representa el rango óptimo de humedad del suelo, para el laboreo. Cuando el contenido de humedad aumenta, la cohesión de los films de agua alrededor de las partículas hace que el suelo permanezca unido y el suelo se vuelve plástico. (Rucks et al, 2004)

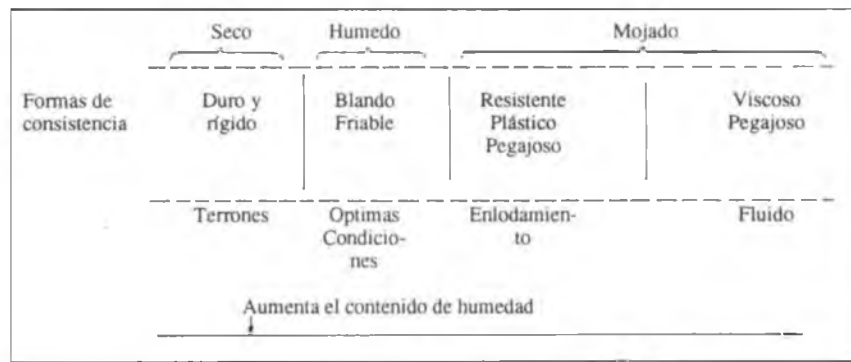


Figura 8.3 Relación de las formas de consistencia, con el contenido de humedad del suelo

Fuente: Rucks (2004)

La consistencia del suelo incluye la resistencia a la compresión, resistencia al esfuerzo cortante, friabilidad, plasticidad y glutinosidad, propiedades que se manifiestan de modo diferente según varían las fuerzas de adhesión y cohesión. (Baver et al, 1972)

#### 8.1.3.1.1 Friabilidad

La friabilidad es la facilidad de desmenuzarse. La friabilidad se caracteriza por tener:

- El estado de humedad ideal en los suelos para la labranza.
- Mejor estado de agregación (mejor textura) para el cultivo.
- La cohesión mínima.
- No tener agua suficiente para la formación de películas en los contactos entre las partículas y producir la cohesión existente en el estado plástico.

#### 8.1.3.1.2 Plasticidad

Se define como “un carácter de la arcilla que le permite captar agua y constituir una masa que puede adquirir cualquier forma bajo una fuerza superior al límite de fluencia y que conserva esta forma al cesar la presión de deformación”. (Baver et al, 1972)

Por lo tanto la plasticidad es el efecto resultante del esfuerzo y la deformación. El grado de deformación es determinado por la distancia en que pueden moverse las partículas sin perder cohesión. La presión que se requiere para producir una deformación específica es un índice de la magnitud de las fuerzas de cohesión que mantiene a las partículas unidas. Estas fuerzas varían con el espesor de las películas de agua entre las partículas. (Baver et al, 1972)

Uno de los métodos empleados por muchos científicos e ingenieros de suelos para medir la plasticidad son los *Límites de Atterberg*. Atterberg (1911) estudió el intervalo de humedad en el cual la plasticidad se manifiesta, y señaló tres valores:

1. Límite plástico superior (límite líquido): es el contenido de humedad en que la película de humedad se hace tan gruesa que la cohesión decrece y la masa de suelo fluye bajo la acción de una fuerza. (Baver, Gardner, & Gardner, Soil phisical, 1972). También se define como el contenido de humedad en el que el suelo pasa de plástico a viscoso. (Rucks et al, 2004)
2. Límite plástico inferior: contenido mínimo de humedad con el cual el suelo puede convertirse por rodadura en un rollito largo y delgado (3mm de

espesor), es decir, es el contenido de humedad de cambio de consistencia friable a plástica. La orientación de las partículas y su deslizamiento ocurren en este punto, debido a que se ha añadido una cantidad suficiente de agua para dotar a cada partícula de una película de agua adsorbida. (Baver et al, 1972)

3. Índice de plasticidad: es la diferencia entre los límites líquido y plástico. Es una medida indirecta de la fuerza necesaria para moldear el suelo. Es función del número de películas y representa la cantidad de agua que debe añadirse al sistema del suelo para aumentar la distancia entre partículas, desde un espesor de película en el cual ocurre la tensión máxima hasta el espesor en que se produce el flujo. (Baver et al, 1972)

Las constantes de Atteberg están consideradas como los mejores índices de la capacidad de laboreo. No obstante, estudios del significado de las constantes de Atterberg muestran que hay algunas relaciones entre estas constantes y la capacidad de laboreo, no hay evidencias suficientes, para asegurar conclusiones más específicas. Es satisfactorio, sin embargo, considerar el límite inferior de plasticidad como el punto al cual el suelo será enlodado si es trabajado en ó sobre ese contenido de humedad.

#### 8.1.3.1.3 Resistencia de los suelos al esfuerzo cortante

La resistencia de un suelo a la cortadura es la resistencia interna máxima del suelo al movimiento de sus partículas. Las fuerzas que resisten el esfuerzo cortante son las de fricción y cohesión internas o intergranulares. Según la ley de Coulomb:

$$S = C + \tan \phi P \quad (\text{Ecuación 8.1})$$

Donde:

S es la resistencia a la cortadura

C es la cohesión

P es la presión efectiva normal al plano de corte

Tan  $\phi$  es el coeficiente de fricción

La resistencia al deslizamiento de una partícula sobre otra y la trabazón en las partículas son factores físicos que afectan principalmente al coeficiente de fricción ( $\tan \phi$ ). El movimiento de las partículas trabadas requiere que la partícula se mueva verticalmente bajo la acción del esfuerzo aplicado antes de que se mueva horizontalmente sobre una partícula adyacente. (Baver et al, 1972)

Los factores que afectan a la cohesión son: a) el agua, ya que afecta la distancias entre partículas y a las fuerzas de atracción asociadas con los meniscos aire-agua. Y b) la aplicación de las fuerzas de compresión al suelo, ya que estas aumentan la cohesión, orientando las partículas, reduciendo el espacio entre ellas y activando las fuerzas de atracción y repulsión. (Baver et al, 1972)

#### *Relación con la plasticidad*

El valor de este corte en suelos plásticos aumenta proporcionalmente al esfuerzo aplicado en dirección normal al plano de corte. El valor de corte en un suelo no consolidado aumenta linealmente con la humedad hasta alcanzar un máximo cerca del límite plástico y luego decrece hasta un nivel muy pequeño en el límite líquido (Figura 8.11). (Baver et al, 1972)

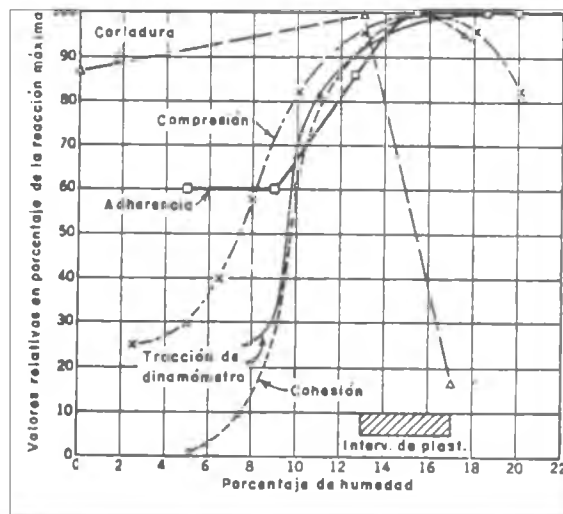


Figura 8.4 Los factores dinámicos de labranza en relación con la humedad del suelo y el intervalo de plasticidad. (El valor máximo de cada uno de los valores se ha tomado como valor 100).

Fuente: Baver et al (1972)

#### 8.1.3.1.4 Compresión-Pudelado

La compresión se define como la variación de volumen del suelo bajo un esfuerzo aplicado. Los suelos pueden ser comprimidos bajo presiones altas o bajas. El esfuerzo cortante puede estar o no presente durante la compresión. La orientación de las partículas y los cambios de tamaño de los coloides son las causas principales de la compresión. (Baver et al, 1972)

La orientación de las partículas predomina cuando se comprime a baja presión. Y bajo alta presión el suelo se expande al cesar la carga. (Baver et al, 1972)

La compresión aumenta con el contenido de humedad hasta alcanzar un máximo y luego disminuye a medida que aumenta la humedad. Este máximo ocurre dentro de la zona plástica, como resultado de la creciente facilidad para que las partículas se orienten por encima del límite plástico. (Baver et al, 1972)

#### *Pudelado del suelo*

El pudelado del suelo es la reducción del volumen específico aparente en un suelo causado por trabajo mecánico. Se dice que “pudelabilidad” es la susceptibilidad de los suelos a los esfuerzos normales de compresión y al esfuerzo tangencial cortante.

#### **8.1.3.2 Resistencia a la penetración**

La resistencia de un suelo a la penetración de un instrumento de sondeo es un índice integrado de la compactación de suelo, contenido de humedad, textura y tipo de mineral de arcilla. Es una determinación que implica la consistencia y la estructura del suelo. (Baver et al, 1972)

A medida que el Penetrómetro entra en el suelo, encuentra la resistencia a la compresión, la fricción entre el suelo y el metal y la resistencia del esfuerzo al cortante, que implica la fricción interna y la cohesión. (Baver et al, 1972)

En la magnitud de la resistencia a la penetración influyen la presión y la fricción entre el suelo y el metal. Hay compresión cilíndrica del suelo en el extremo de una sonda cónica. Esta compresión consta de dos zonas cuando el suelo se ajusta al volumen de la

sonda, la zona plástica y la elástica. La zona plástica es donde el radio de la zona de compresión varía según el índice de compresibilidad el suelo. Fuera de esta zona plástica existe la zona de compresión elástica. La componente vertical de la presión necesaria para producir esta compresión y resistencia friccional resultante constituyen la resistencia total del punto. (Baver et al, 1972)

Existen varios tipos de Penetrómetro, uno de los más usados es el de forma de cono, usualmente cuando la resistencia a la penetración es mayor que 300 psi, el suelo se encuentra muy duro para permitir el crecimiento de las raíces. Se debe recordar que la resistencia del suelo depende de la humedad y de la densidad aparente, ya que se pueden llegar a obtener valores muy variables dependiendo del momento de la toma de datos, por ejemplo cuando la toma de datos se realiza en el estado seco, lo valores tenderán a ser más altos, y si se realiza en el estado lluvioso los valores serán más bajos. (Magdoff, 2000)

#### 8.1.4 Capacidad hídrica del suelo

Resulta fundamental conocer cuál es la disponibilidad de agua en el suelo, para suplir la demanda de los cultivos. Ella está directamente relacionada con la matriz de suelo, y por lo tanto su retención estará sometida a principios y leyes físicas y características mecánicas de los suelos.

En términos prácticos, el agua en el suelo presenta diferentes tasas de disponibilidad para las plantas creciendo sobre él. Estas cantidades de agua disponible están normalmente asociadas a una determinada tensión interna, traducida como la presión negativa ejercida por una columna de agua. La presión es una fuerza que se realiza por ejemplo para empujar un cuerpo. La tensión es la misma magnitud de fuerza, pero en sentido contrario, es decir tirando al mismo cuerpo, por lo que la presión cambia de signo pasando a ser negativa. (García, Sosa, & Fernández)

Las cantidades de agua mencionadas están relacionadas con el contenido volumétrico de agua en el suelo y que incide sobre la fuerza con que ella está retenida en



el suelo y se denominan Constantes Hídricas. Los valores más utilizados de límites de tensión a la que está retenida el agua en el suelo y que definen su estado energético son Capacidad de Campo (CC) y Porcentaje de Marchitez Permanente (PMP). Esto se representa mediante una curva que indica el contenido hídrico volumétrico o específico en equilibrio con una succión matriz o succión total específica (Figura 8.5). (García, Sosa, & Fernández)

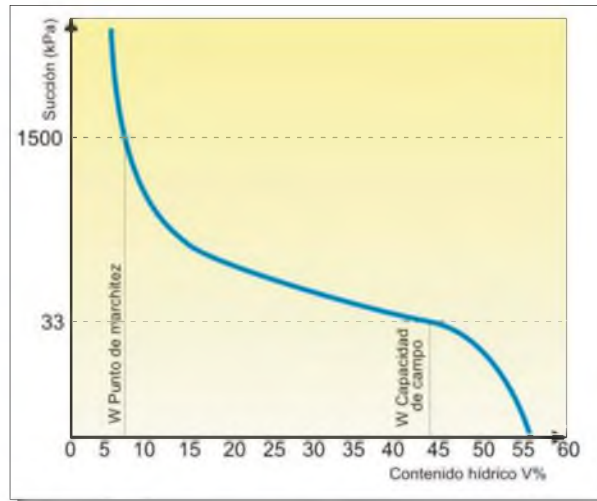


Figura 8.5 Curva de capacidad hídrica

Fuente: (García, Sosa, & Fernández)

#### *Capacidad de campo (C.C)*

Se define como la cantidad de agua que un suelo retiene contra la gravedad cuando se le deja drenar libremente. En un suelo bien drenado, por lo general se llega a ese punto, aproximadamente 48h después de irrigar. (Gavande, 1972) El potencial mátrico al que esto ocurre varía entre -5 y -40 KPa, (Radulovich, 2009) normalmente se utiliza -33.3 KPa. (García, Sosa, & Fernández)

#### *Punto de Marchitez Permanente (P.M.P)*

El punto de marchitez permanente es cuando una planta ya no puede extraer suficiente agua para recuperar turgencia, y tradicionalmente se sitúa en un potencial mátrico de -1.5MPa. (Radulovich, 2009)

A través de la curva de capacidad hídrica puede conocerse la distribución de poros del suelo que varía según:

- Textura
- Estructura
- Compactación
- Temperatura

#### *Influencia en la textura y estructura*

Cuando la succión es baja (0-1 atm) es decir que el agua no está muy fuertemente retenida, el contenido hídrico depende fundamentalmente del estado estructural que tenga el suelo (Figura 8.6). A medida que el suelo se va secando, la succión comienza a aumentar, y el contenido hídrico depende más de la textura del suelo a través de la superficie específica. La presencia de arcillas provoca grandes variaciones en el trazado de la curva. El valor de contenido hídrico para una misma succión es mayor en suelos de textura fina que en suelos de textura gruesa (Figura 8.7).

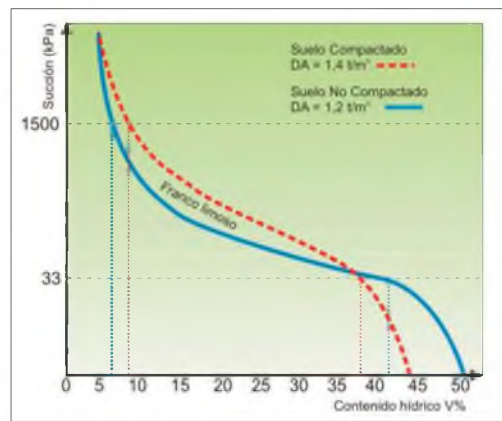


Figura 8.6 Influencia de la estructura en la forma de la curva de capacidad hídrica

Fuente: (García, Sosa, & Fernández)

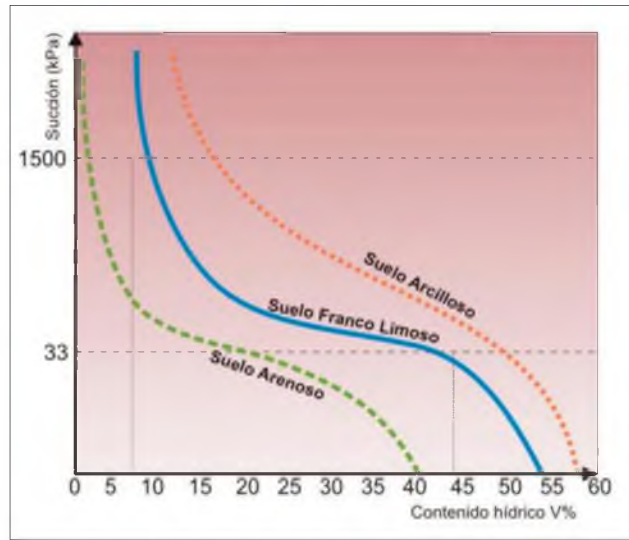


Figura 8.7 Influencia de la textura en la forma de la curva de capacidad hídrica

Fuente: (García, Sosa, & Fernández)

### *Compactación*

La influencia fundamental de compactación está en los poros de drenaje, hay una disminución de los mismos, y un aumento de los poros de almacenaje. Según esto, podría interpretarse que la compactación es beneficiosa por aumentar la proporción de poros de almacenaje, pero los poros de drenaje son importantes porque son los que ofrecen menos resistencia a la entrada del agua, ayudan a la permeabilidad del suelo y a la distribución proporcional de las fases sólida, líquida y gaseosa del mismo.

### *Temperatura*

Influye en la curva de capacidad hídrica a través de su acción sobre la tensión superficial. Disminuye con el aumento de la temperatura.

## 8.2 Procedimientos

### 8.2.1 Cuarteo

En el área de muestreo definida se procede a hacer un recorrido en zig-zag, evitando tomar submuestras de lugares con alguna particularidad, que no sea representativa de toda el área que se está muestreando. (Henríquez et al, 1999)

Luego de tomar las submuestras estas se homogenizan y se extienden sobre una lona plástica y se realizan los siguientes pasos:

- a) Tomar una esquina de la lona y levantarla hacia el centro de la misma, moviéndola hacia arriba y hacia adelante.
- b) Repetir el mismo procedimiento para las tres esquinas restantes de la lona.
- c) Al abrir las esquinas de la lona, con las manos o ayuda de una regla, se dividirá el suelo en partes iguales.
- d) Para una primera reducción de la muestra compuesta, se retirarán de la lona los dos cuartos opuestos y de número impar. Con esta operación la muestra compuesta quedara reducida a la mitad de su peso.
- e) Se reunirán nuevamente los dos cuartos restantes en el centro de la lona y se repetirán los pasos c) a g).
- f) Hacer una segunda reducción de la muestra eliminando ahora los dos cuartos con número par. La muestra compuesta quedara reducida a un cuarto de su peso original.
- g) Repetir el paso de c) a g) nuevamente y eliminar los cuartos impares y así sucesivamente hasta que quede un remanente aproximado de 1 Kg que será la muestra representativa (Figura 8.8).

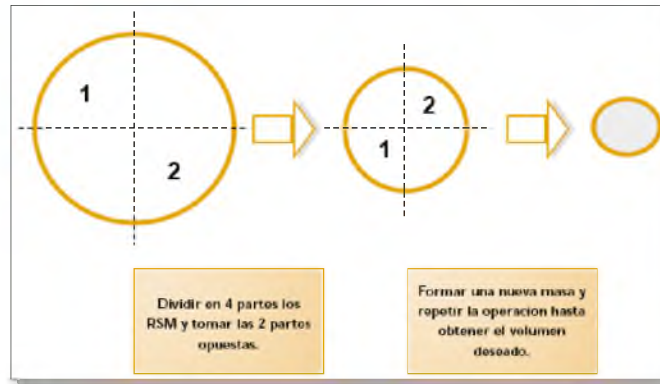


Figura 8.8 Método del cuarteo

Fuente: <http://www.cepis.org.pe>

### 8.2.2 Gravedad específica (ASTM D-854)

La gravedad específica es la relación del peso unitario de un cuerpo referida a la densidad del agua, en condiciones de laboratorio y por lo tanto a su peso unitario.

El procedimiento a seguir es:

1. Se pone a secar el suelo al aire y se pasa a través de la malla #4
2. Se introducen 35g en el picnómetro y se le agrega agua destilada por debajo del cuello.
3. Se extraen las burbujas de aire con una bomba de vacío por un tiempo de 2 h.
4. Se llena el picnómetro hasta la marca de calibración con agua destilada.
5. Se equilibra la temperatura de la muestra en el picnómetro a 23°C.
6. Se pesa el picnómetro con la muestra y el agua.
7. Utilizando los gráficos de calibración (existentes en el laboratorio) se debe obtener el peso del picnómetro de acuerdo a su capacidad a esa misma temperatura.
8. Se recupera la muestra del suelo en una cápsula de humedad y se introduce en el horno para secarlo.

9. Se pesa la muestra seca (a temperatura ambiente) para obtener el peso seco del aire.

10. Se determina la gravedad específica del suelo de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$G_s = \frac{W_s}{W_1 - (W_2 - W_s)} \quad (\text{Ecuación 8.2})$$

Donde:

$G_s$  es la Gravedad específica

$W_s$  es el peso seco del suelo

$W_1$  es el peso del picnómetro más el agua

$W_2$  es el peso de  $W_1$  más la muestra de suelo



Figura 8.9 Procedimiento de la norma ASTM D-854

### 8.2.3 Limites Atterberg (ASTM D-4318)

La muestra de suelo se pone a secar al aire y luego se muele en un recipiente de porcelana, hasta que la muestra pueda pasar por la malla N° 40.

#### **8.2.3.1 Limite líquido**

1. Se colocan aproximadamente 150 g de suelo en un recipiente y se le añade lentamente agua hasta formar una pasta suave y uniforme, removiendo y amasando el suelo con una espátula.
2. Una vez la masa homogénea se deja reposar mínimo 16 horas. Se introduce el recipiente en una bolsa plástica para que no haya pérdida de agua.
3. Se inspecciona que la caída de la copa de la Cuchara Casagrande sea exactamente de un centímetro.
4. Luego del reposo se coloca una porción en la Cuchara de Casagrande, extendiéndolo y emparejándolo con una espátula, teniendo cuidado que no se formen burbujas de aire en la masa de suelo.
5. Mediante el uso de la herramienta ranurada, se hace un canal en el centro de la masa, moviendo esta de forma que vaya rozando el fondo de la cuchara y manteniéndole perpendicular, para separar la masa por completo en dos partes.
6. Por medio del manubrio de la Cuchara Casagrande se deja caer la cuchara a razón de dos revoluciones por segundo y se hace el conteo de golpes necesarios para que las dos mitades se unan en su base en una distancia de 12.7mm aproximadamente.
7. Si la cantidad de golpes no está entre 15 y 35 se debe de secar o agregar agua según sea el caso. Y si se encuentra dentro de los límites se toma una porción del suelo de aproximadamente el ancho de la espátula y perpendicular al canal y se coloca en un recipiente para determinar el contenido de humedad y otra para realizar el límite plástico.

8. Para determinar la humedad de la muestra tomada, se pesa el recipiente y se pone a secar en el horno por 24 horas.
9. El suelo que queda en la cuchara se recoge y se mezcla con el resto de la muestra. Se limpia bien la cuchara.
10. Repetir el proceso de humedecer y colocar la muestra en la cuchara hasta obtener datos en los rangos 15-25 de 20-30 y de 25-35.
11. Se construye un gráfico de porcentaje de humedad (%W) en las abscisas con escala aritmética, contra número de golpes (n) en las ordenadas con escala logarítmica. El límite líquido corresponde a la humedad correspondiente a 25 golpes.

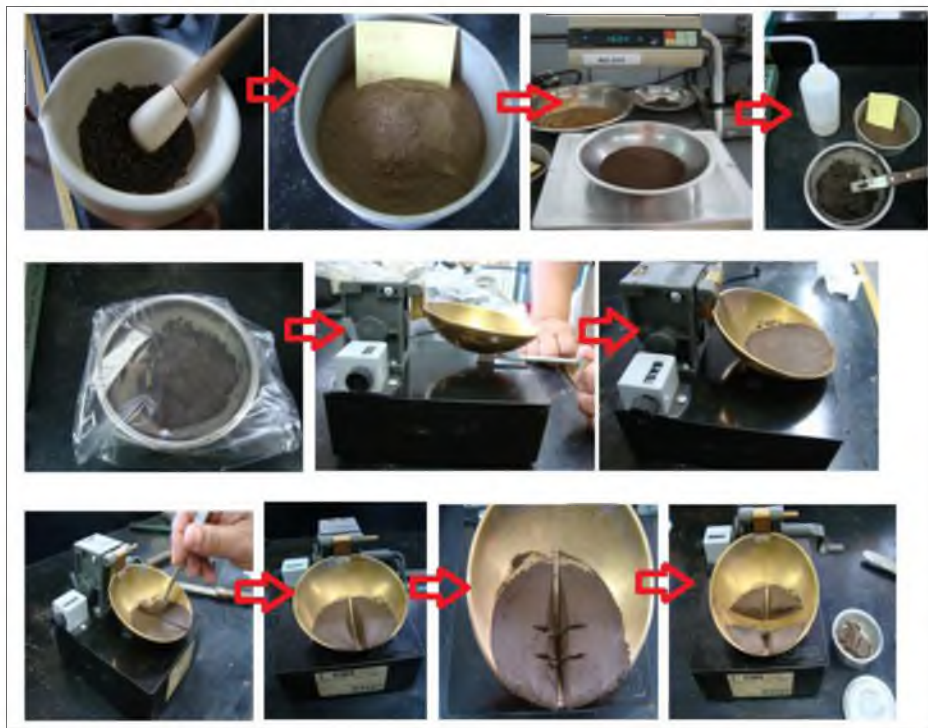


Figura 8.10 Procedimiento del límite líquido según la norma ASTM D-4318

### 8.2.3.2 Límite Plástico

1. Se toma la muestra separada de la práctica del límite líquido; debe de tomarse en una etapa del proceso de amasado en que se pueda formar



fácilmente una bola con ella, sin que se pegue a los dedos al aplastarla o sin que se desborone.

2. La bola se divide en dos mitades y cada mitad se divide en tres. Cada tercera parte se rueda entre los dedos, en una placa de vidrio, con la presión necesaria para formar cilindros de 3 mm que presentan señales de agrietamiento.
3. El cilindro resultante se separa en varios fragmentos y se coloca en recipientes que pesen junto con la muestra aproximadamente 7g, para determinar su humedad.
4. Se pesa el recipiente y se determina el límite plástico, que corresponde con promedio el promedio de estos porcentajes de humedad obtenidos.
5. Se calcula el índice de plasticidad del suelo como la diferencia entre el límite líquido y el plástico.

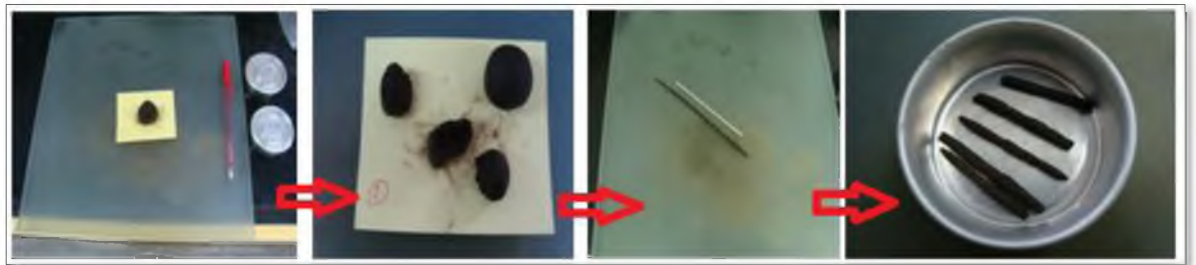


Figura 8.11 Procedimiento del Límite Plástico según la norma ASTM D-4318

## 8.2.4 Análisis Granulométrico (ASTM D-422)

### 8.2.4.1 Análisis por sedimentación –hidrómetro

1. Realizar el análisis del hidrómetro modelo 152H, para conocer la corrección de cero y la corrección del menisco.
2. Tomar exactamente 50 g de suelo secado al horno y pulverizado y mezclarlo con 125 ml de solución de hexametáfosfato de sodio.

3. Dejar reposar la muestra de suelo por 16 horas.
4. Transferir la mezcla al vaso de la mezcladora automática y añadir agua común hasta llenar  $\frac{2}{3}$  del vaso. Mezclarlo por espacio de un minuto.
5. Transferir el contenido del vaso de la mezcladora a un cilindro de sedimentación, teniendo mucho cuidado de no perder material en el proceso. Añadir agua común hasta completar la marca de 1,000 cm de cilindro.
6. Preparar el cilindro patrón de control con agua común y 125 cm de la solución de dispersante al cuatro por ciento o la misma que se utilizó en el paso dos. Verificar que la temperatura del agua común sea igual para ambos cilindros, el de sedimentación y el de control.
7. Tomar un tapón de caucho para tapar la boca del cilindro donde se encuentra la suspensión de suelo y agitarla cuidadosamente por cerca de un minuto.
8. Colocar sobre la mesa el cilindro, remover el tapón inmediatamente e insertar el hidrómetro y tomar lecturas con los siguientes intervalos de tiempo: uno, dos, tres y cuatro minutos. Tomar igualmente lecturas del termómetro en los mismos intervalos de tiempo.
9. Colocar el hidrómetro y el termómetro en el recipiente de control (el cual debe encontrarse a una temperatura que no difiera en más de un grado Celsius del suelo). Tomar una lectura para corrección de menisco en el hidrómetro dentro del cilindro de control.
10. Volver a agitar la suspensión y volver a tomar otra serie de medidas a uno, dos, tres y cuatro minutos. Repetir tantas veces como se necesite con el fin de obtener dos juegos de mediciones que concuerden a la unidad en cada una de las cuatro mediciones.
11. Una vez que se haya logrado esto, se deben tomar mediciones adicionales a los siguientes intervalos de tiempo: 2, 5, 15, 30, 60, 250, 1440, 2880 minutos.
12. Registrar la temperatura de la suspensión suelo – agua con una precisión de un grado Celsius para cada medición del hidrómetro. Entre lectura y lectura del

hidrómetro se debe guardar éste y el termómetro en el cilindro de control (el cual debe estar a la misma temperatura).

13. Aplicar la corrección de menisco a las lecturas de hidrómetro y utilizando las tablas obtenidas en la norma ASTM- D422 obtener los valores de diámetro de partículas.



Figura 8.12. Procedimientos para análisis granulométrico por el método del hidrómetro

### 8.2.5 Procedimiento para realizar la prueba con tamizado

1. Obtener la muestra de suelo resultante de la mezcla del procedimiento anterior e introducirlo en un recipiente.
2. Colocar la muestra en el horno para que el contenido de humedad que exista desaparezca.
3. Sacar la muestra del horno y colocarlo en el tamiz No. 200 de lavado, lavar cuidadosamente el material a través del tamiz utilizando agua común hasta que el agua que pasa a través del tamiz mantenga su transparencia. Es necesario ser cuidadoso en este proceso para evitar daños en el tamiz y la pérdida de suelo que eventualmente pueda salpicar fuera del tamiz.
4. Verter cuidadosamente el residuo, con ayuda de agua, en un recipiente de secado y permitir por un período de tiempo suficiente hasta lograr que el agua en la parte

superficial de la suspensión se vuelva transparente. Botar tanto como se pueda de esta agua transparente y colocar el recipiente con la suspensión suelo – agua en el horno de secado.

5. Al día siguiente, pesar el residuo secado al horno (PBS).
6. Hacer pasar la muestra a través de una serie de tamices que varíen desde los diámetros mayores hasta los diámetros inferiores en un agitador eléctrico automático. Como el objetivo de la práctica es lograr una curva semilogarítmica del porcentaje de material más fino contra el tamaño de las partículas, será necesario obtener una distribución razonable de puntos a lo largo del rango potencial de diámetros presentes en la muestra.
7. Retirar la serie de tamices del agitador mecánico y obtener el peso del material que quedó retenido en cada tamiz. Sumar estos pesos y comparar el total con el peso obtenido en el paso cuatro (el residuo de material procedente del secado al horno con el cual se comenzó). Esta operación permite detectar cualquier pérdida de suelo durante el proceso de tamizado mecánico. Si se tiene una pérdida más del dos por ciento con respecto al peso original se considera no satisfactorio.
8. Calcular el porcentaje en cada tamiz dividiendo el peso retenido en cada uno de ellos por el peso de la muestra original obtenido en el paso uno, esto es válido ya que el material que haya pasado a través del tamiz No.200 pasaría cualquier otro por encima del mismo en la serie.
9. Calcular el porcentaje que pasa (o el porcentaje más fino) comenzando por 100% y sustraer el porcentaje retenido en cada tamiz como un proceso acumulado.
10. Trazar la curva granulométrica, colocando en el eje de las abscisas en escala semilogarítmica el diámetro en milímetros y en el eje de las ordenadas en escala aritmética el porcentaje que pasa.



Figura 8.13. Procedimiento para realizar análisis granulométrico con tamizado



Figura 8.14. Colocación de una muestra de suelo en el juego de tamices

## 8.2.6 Tabla de Criterios de SUCS

Criterios para la asignación de símbolos de grupo y nombre de grupo con el uso de ensayos de laboratorio			Clasificación de suelos		
			Símbolo de grupo	Nombre del grupo	
Suelos de partículas gruesas más del 50% es retenido en la malla No. 200	Gravas Más del 50% de la fracción gruesa es retenida en la malla No. 4	Gravas limpias Menos del 5% pasa la malla No. 200	Cu > 4 y 1 < Co < 3	GW	Grava bien graduada
			Cu < 4 y 1 > Co > 3	GP	Grava mal graduada
		Gravas con finos Más del 12% pasa la malla No. 200	IP < 4 o debajo de la línea "A" en la carta de plasticidad	GM	Grava limosa
			IP > 7 o arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad	GC	Grava arcillosa
		Gravas limpias y con finos Entre el 5 y 12% pasa malla No. 200	Cumpla los criterios para GW y GM	GW-GM	Grava bien graduada con limo
			Cumpla los criterios para GW y GC	GW-GC	Grava bien graduada con arcilla
	Arenas El 50% o más de la fracción gruesa pasa la malla No. 4	Arenas limpias Menos del 5% pasa la malla No. 200	Cu > 8 y 1 < Co < 3	SW	Arena bien graduada
			Cu < 8 y 1 > Co > 3	SP	Arena mal graduada
		Arenas con finos Más del 12% pasa la malla No. 200	IP < 4 o debajo de la línea "A" en la carta de plasticidad	SM	Arena limosa
			IP > 7 o arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad	SC	Arena arcillosa
		Arenas limpias y con finos Entre el 5 y 12% pasa malla No. 200	Cumpla los criterios para SW y SM	SW-SM	Arena bien graduada con limo
			Cumpla los criterios para SW y SC	SW-SC	Arena bien graduada con arcilla
Suelos de partículas finas El 50% o más pasa la malla No. 200	Limos y arcillas Límite Líquido menor que 50	Inorgánicos	IP > 7 y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea "A"	CL	Arcilla de baja plasticidad
			IP < 4 y se grafica en la carta de plasticidad abajo de la línea "A"	ML	Limo de baja plasticidad
		Orgánicos	Límite líquido - secado al horno < 0,75	OL	Arcilla orgánica
			límite líquido - no secado		Limo orgánico
	Limos y arcillas Límite Líquido mayor que 50	Inorgánicos	IP > 7 y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea "A"	CH	Arcilla de alta plasticidad
			IP < 4 y se grafica en la carta de plasticidad abajo de la línea "A"	MH	Limo de alta plasticidad
		Orgánicos	Límite líquido - secado al horno < 0,75	OH	Arcilla orgánica
			límite líquido - no secado		Limo orgánico
		Suelos altamente orgánicos	Principalmente materia orgánica de color oscuro	PT	Turba

Figura 8.15. Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) ASTM D-2487

Autores: Ing. Iván Matus Lazo y Ing. Marvin Blanco Rodríguez



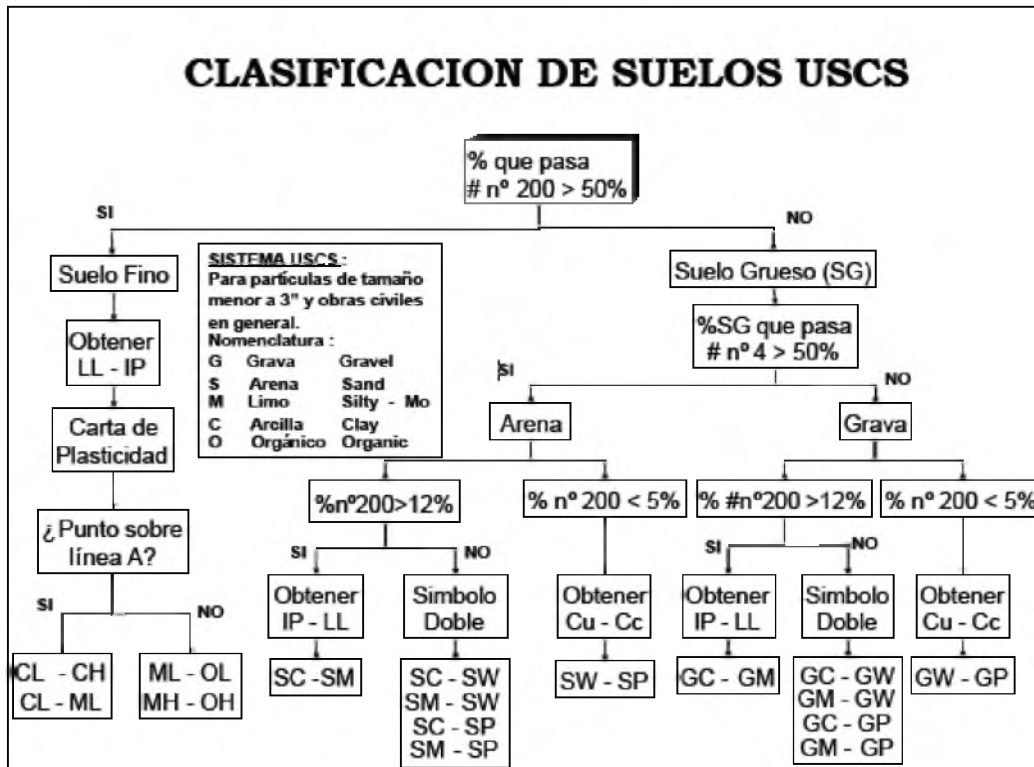


Figura 8.16. Clasificación de suelos USCS  
Fuente: Universidad Católica de Valparaíso, 2003

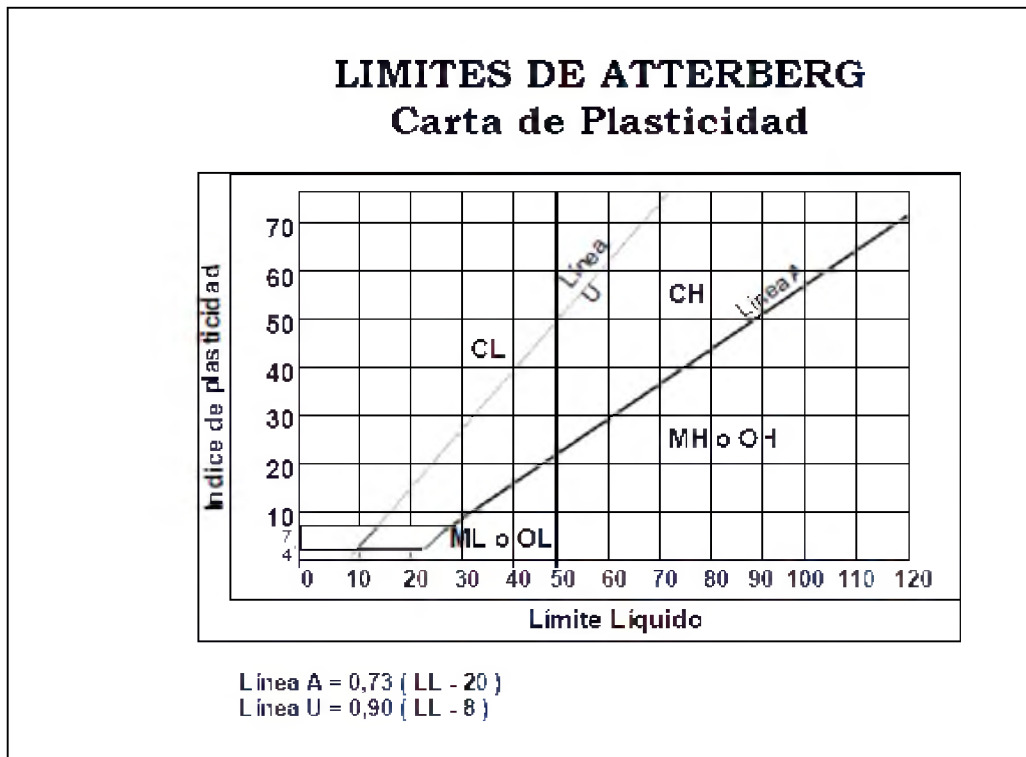


Figura 8.17. Carta de Plasticidad

Fuente: Universidad Católica de Valparaíso, 2003

#### 8.2.7 Método de Bouyoucos

1. Pesar 40 g de muestra secada al horno a 110°C por 24 horas.
2. Tamizar la muestra por una malla de 2 mm.
3. Colocar la muestra en una licuadora de suelos y agregarle 200 ml de agua y 10 ml de solución dispersante (hexametáfosfato de sodio) y licuar por 10 min.
4. Trasvasar al cilindro de agitación y aforar con el hidrómetro dentro del cilindro, luego sacar el hidrómetro.
5. Tapar el cilindro y agitarlo por 30 segundos.
6. Colocarlo en la mesa y agregarle dos gotas de alcohol amílico en caso de que se forme espuma (Figura 8.18).



7. Tomar la primera lectura con el hidrómetro y el termómetro a los 40 segundos.
8. Tomar la siguiente lectura a las dos horas.
9. Realizar las siguientes correcciones: por cada grado centígrado arriba de 19,4°C agregar 0.3 a la lectura del hidrómetro, por cada grado debajo de 19,4°C restar 0.3.
10. Determinar los contenidos porcentuales de los componentes arenas, limos y arcillas con las siguientes ecuaciones:

$\% \text{ material en suspensión} = (\text{lectura corregida } 40'' \times 100) / \text{peso de muestra}$

$\% \text{ arenas totales} = 100 - \% \text{ material en suspensión } 40''$

$\% \text{ arcillas totales} = (\text{lectura corregida } 2 \text{ horas} \times 100) / \text{peso de muestra}$

$\% \text{ limos totales} = 100 - (\% \text{ arenas} + \% \text{ arcillas})$

11. Determinar el nombre textural con la ayuda del triangulo de texturas (Figura 8.19).



Figura 8.18. Bouyucos

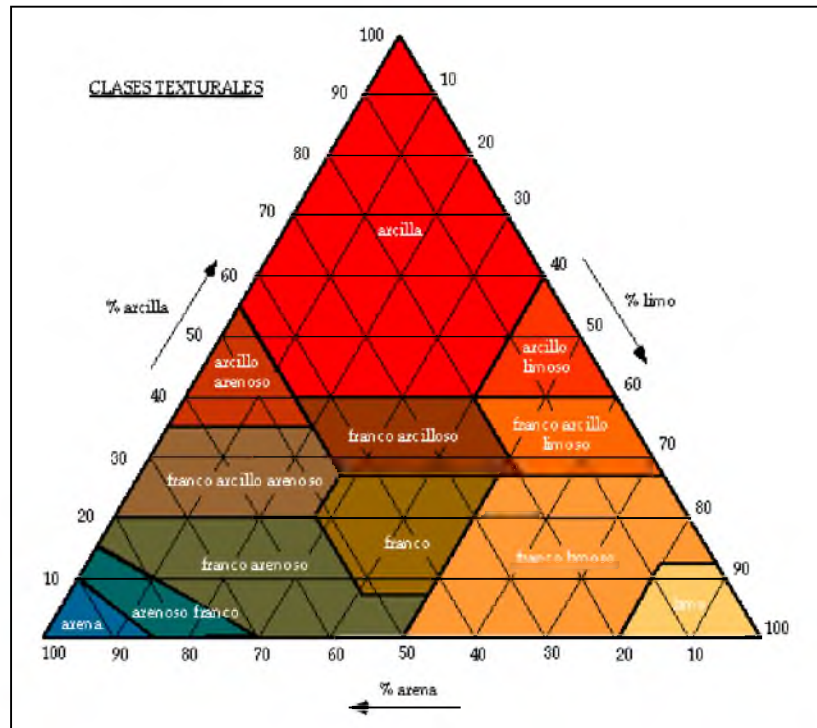


Figura 8.19. Triángulo textura

Fuente: [www.edafología.ugr.es](http://www.edafología.ugr.es)

### 8.2.8 Método de oxidación

1. Pesar 0.5 g de suelo y ponerlo en un erlenmeyer de 500 ml.
2. Agregar 10 ml de  $K_2Cr_2O_7$  1N\* con pipeta.
3. Agregar 20 ml de  $H_2SO_4$  con probeta
4. Agitar 1 min
5. Dejar en reposo 30 min
6. Diluir con 200 ml de agua destilada
7. Añadir 10 ml de  $H_3PO_4$  al 85% con probeta
8. Añadir 0.2 g de NaF
9. Añadir 30 gotas de indicador difenilamina
10. Titular el exceso de dicromato con  $Fe (NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6 H_2O$  0,5 N\*. El color cambia de verde oscuro a un azul turbio y en el punto final, con una gota, cambia bruscamente a verde brillante.

11. Ecuación:

$$\% M.O = 10 * \left(1 - \frac{T}{S}\right) * 1.34$$

Donde:

10 = ml de dicromato de potasio 1.0 N iniciales.

T= ml de sulfato amónico ferroso 0.5 N gastados en la titulación de la muestra de suelo.

S= ml de sulfato amónico ferroso 0.5 N gastados en la titulación de la muestra en blanco.

1.34 = un factor que corresponde a 0.779\* carbón orgánico.

#### 8.2.9 Retención de Humedad del suelo

1. Realizar un muestreo de suelo a los 20 cm superficiales. Las muestras deben ser indisturbadas, para esto se utilizan los anillos metálicos.
2. Retirar la porción de la muestra que sobresalga por las caras superior del anillo, hasta lograr una superficie continua a nivel; para esto puede usarse un cuchillo.
3. En el laboratorio las muestras de suelo se colocan en los platos porosos y puestos a saturación por 24 horas.
4. Después de saturadas las muestras en los platos, se colocan en las ollas de presión, conectando el tubo de drenaje. Se cierran bien las ollas y se conecta la fuente de presión, la cual puede ser un compresor de aire o bien un tanque de aire comprimido (al menos 250 libras de presión). Se obtienen dos puntos, uno a 0,33 bares y otro a 15 bares para determinar el agua disponible.
5. Las muestras se dejan en las ollas hasta 48 horas en suelos muy arcillosos para poder estabilizar las presiones.
6. Luego de ese periodo de tiempo, se tapa el extremo del tubo de drenaje de la olla con un tapón para impedir el regreso de agua al plato y de esta

forma evitar que se moje la muestra; después se cierra el flujo de presión de aire, se abren las válvulas de salida de aire y se sacan las muestras.

7. Pesar inmediatamente las muestras y ponerlas a secar en un horno a 110°C por 24 horas.
8. Se determina su peso seco y se calcula la humedad gravimétrica.

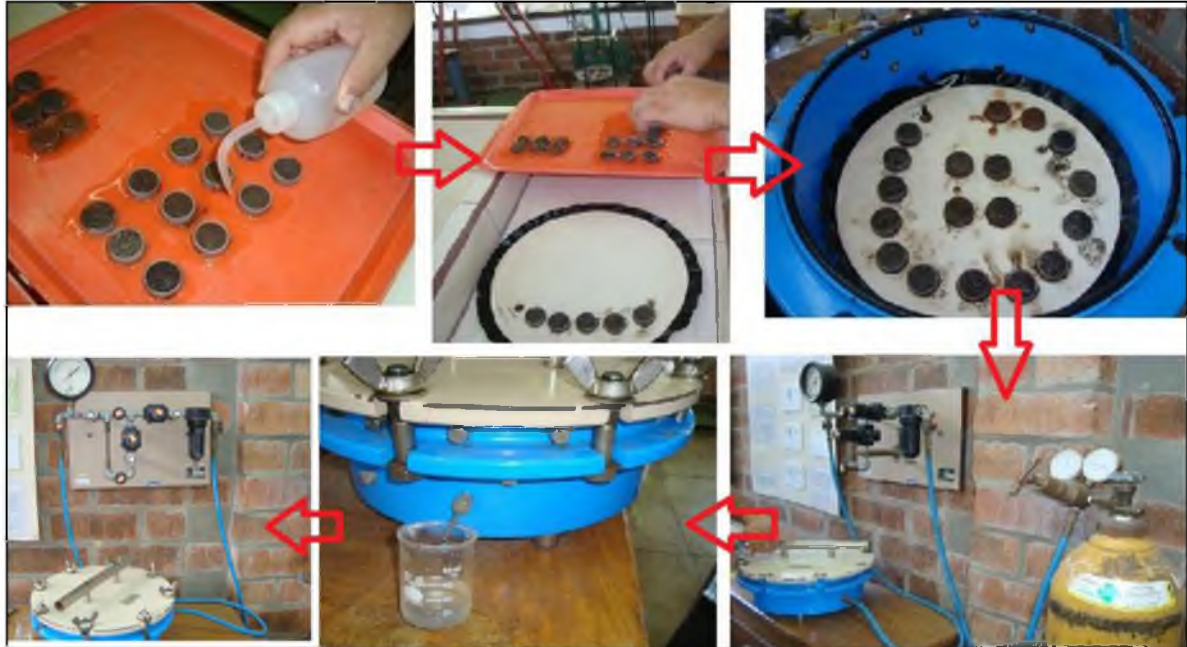


Figura 8.20. Retención de humedad, método de la olla de presión

#### 8.2.10 Análisis de esfuerzo máximo de corte

1. Colocar la muestra obtenida con el anillo de metal en la cuchilla de corte de mesa.
2. Asegurarse que el medidor de grados de rotación se encuentre en cero.
3. Sostener el anillo con la mano de tal manera que cuando se aplique el torque esta no se mueva.
4. Manualmente dar giros a la palanca en sentido de las manecillas del reloj para que la veleta comience a moverse verticalmente e inicie a introducirse en la muestra.

5. Dar giros que no excedan  $0,1^\circ/s$  hasta que las cuchillas comiencen a desaparecerse en el suelo y se dé la falla. Generalmente se requieren para la falla entre 2 a 5 min, dependiendo de la cantidad de arcilla.
6. Cuando se da la falla, anotar el momento máximo, el cual depende de los grados de rotación.
7. Calcular el esfuerzo máximo de corte según las especificaciones del aparato utilizado.

#### 8.2.11 Análisis de Consolidación

1. Retirar la porción de la muestra que sobresalga por las caras superior del anillo, hasta lograr una superficie continua a nivel; para esto puede usarse un cuchillo.
2. Llevar la muestra a capacidad de campo.
3. Usando una balanza, pesar el conjunto de la muestra y el anillo.
4. Colocar y centrar cuidadosamente las piedras porosas ligeramente humedecidas en la bases del anillo, presionándolas muy suavemente contra la muestra, a fin de lograr que se adhieran.
5. Colocar ahora con cuidado el anillo en la cazuela del consolidómetro, cuidando que el anillo ya no sufra ningún movimiento, una vez colocado
6. Con mucho cuidado, a fin de evitar movimientos del anillo y de las piedras porosas en la cazuela, colocar ésta sobre la plataforma del banco de consolidación y centrar cuidadosamente la piedra porosa superior bajo el marco de carga.
7. Balancear la palanca de carga y ajustar la elevación de la pieza transversal superior del marco de carga, hasta que el marco quede en contacto con la pequeña esfera metálica alojada en la muesca de la placa de carga (un pequeño peso que actúe sobre el marco de carga hará el contacto estable) previamente colocada sobre la piedra porosa superior. Comprobar la horizontalidad de la pieza superior del marco de carga.

8. Colocar el micrómetro, atornillando el puente que lo sostiene y poniéndolo en contacto con el marco de carga; poner el micrómetro en cero.
9. Retirando el pequeño peso actuante sobre el marco de carga, colocar en la ménsula el primer incremento de carga, evitando que el marco cause impacto sobre la muestra y usando el peso apropiado. Anotar esa carga.
10. Observar y anotar las lecturas del micrómetro en intervalos de tiempo con la siguiente secuencia: 30 segundos, un minuto, dos minutos, dos horas, 23 horas y a las 24 horas sin carga.
11. Dibujar la curva de consolidación (trazo semilogarítmico).
12. Proceder entonces a la colocación del segundo incremento de carga en otra muestra, repitiendo los puntos del 8 al 10. Y así proceder sucesivamente hasta completar la prueba en lo referente a ciclo de carga.



Figura 8.21. Procedimiento para realizar curva de consolidación

### 8.2.12 Prueba Proctor Estándar

1. Debe de tomarse una muestra para contenido de humedad 24 horas antes del ensayo, para que sea posible conocer razonablemente el contenido de humedad inicial.

2. Realizar una prueba de compactación tipo C: molde de 101.6 mm, con material que pasa el tamiz 19 mm. Se debe secar al aire o en un horno a 60°C, una muestra representativa que contenga aproximadamente 3 kg de material
3. Se toman tres kilogramos (peso nominal) de suelo, pulverizado suficientemente para que pase a través del tamiz 4.75 mm.
4. Se pesa el molde con su base y sin collar superior y se toman sus dimensiones para corroborar el volumen.
5. Se toman aproximadamente 2.3 kg de suelo y se mezcla con la cantidad de agua necesaria para hacer el incremento de humedad, amasando a fondo la muestra para formar una mezcla uniformemente húmeda (deshacer todos los grumos). La cantidad de agua deberá ser necesaria para que una vez mezclada con el material, este presente una consistencia tal que al ser comprimido en la palma de la mano no deje partículas adheridas a ella ni la humedezca.
6. Unir el collarín al molde y colocar una porción de la mezcla húmeda en el molde, nivelando la superficie con la mano.
7. Se compacta el suelo preparado en el molde en tres capas aproximadamente iguales. El martillo de compactación de 2.5 kg se coloca en el molde y se eleva 305 mm sobre el mango hasta que el pisón alcanza la parte superior de la guía entonces se suelta, permitiendo que este caiga libremente sobre la muestra, sin someterlo a ningún impulso adicional con la mano (caída libre).
8. Se repite el proceso anterior, hasta cubrir sistemáticamente la superficie entera de la muestra, hasta completar las tres capas de 25 golpes cada una.
9. Se retira el anillo y con un enrasador, se recorta la muestra hasta enrasar los bordes del molde de compactación.
10. Se retira todo el exceso de material que haya quedado fuera del molde de modo que esté limpio.
11. Se pesa el conjunto del molde y el suelo compactado.
12. Se retira todo el suelo contenido en el molde y se toman dos muestras para contenido de humedad (no menos de 100g cada una) del centro del material

extraído del molde. Para los cálculos se usará el valor medio, si resulta un dato muy alejado a lo esperado, habrá que descartar uno de los dos.

13. Se repiten las operaciones anteriores con nuevas porciones de material y utilizando diferentes proporciones de agua (entre 1 y 3% en peso). Generalmente tres puntos de manera ascendente y otros dos descendentes son suficientes para definir la curva.

14. Se determina la densidad húmeda en cada punto:

$$\rho_H = P_h / V_t$$

Donde

$\rho_H$  = Densidad húmeda

$P_h$  = Peso del material compactado en el molde

$V_t$  = Volumen del molde

15. Se calcula la densidad seca del mediante la ecuación:

$$\rho_d = \rho_H / (1 + W/100)$$

Donde

$W$  = Contenido de humedad en porcentaje:  $w = (P_h - P_s) / P_s * 100$

16. Con esta información se procede a dibujar la curva de porcentajes de Humedad (abscisas) vrs Densidades secas (ordenadas) y se traza una curva suave. Las coordenadas del máximo en esta curva definen la “densidad máxima seca” y la “humedad óptima” del ensayo Proctor.

17. Calcula la curva de saturación teórica que representa la relación entre la densidad seca y los contenidos de humedad correspondientes cuando los poros del suelo están llenos de agua, a través de la siguiente expresión:

$$W_{sat} = (\rho_w * G_s - \rho_d) / (G_s * \rho_d) * 100$$

Donde

$W_{sat}$  = Contenido de humedad para la saturación completa



$\rho_w$  = Densidad del agua

$\rho_d$  = Densidad seca del suelo

$G_s$  = Gravedad específica



Figura 8.22. Procedimiento para prueba Proctor Estándar

### 8.2.13 Método del cono de arena

Para poder utilizar los aparatos para dicho método, es necesario determinar la densidad aparente de la arena de ensaye y la masa de arena que llena el embudo.

#### **8.2.13.1 Determinación de la densidad aparente de la arena de ensaye:**

1. Llenar el aparato de densidad con la arena de ensaye.
2. Colocar el depósito limpio y seco sobre una superficie plana, firme y horizontal; montar sobre él la placa base y asentar el aparato de densidad

boca abajo sobre la placa, procurando que la operación sea similar a la que va a realizarse en el terreno.

3. Abrir la válvula, dejar fluir la arena y cerrar la válvula cuando la arena sobrepase el borde de la medida.
4. Retirar el aparato de densidad, la placa base y el exceso de arena, enrasar cuidadosamente sin producir vibración.
5. Determinar la masa de la arena que llena la medida ( $m_a$ ), aproximado a 1g
6. Determinar la densidad de la arena dividiendo la masa de la arena que llena la medida por la capacidad volumétrica de la medida.
7. Repetir toda la operación 5 veces, elegir los tres resultados más próximos (que no difieran entre sí en más 0.1%)
8. Determinar y registrar la densidad aparente de la arena de ensaye como el promedio de los tres resultados elegidos, aproximados a 1 g/ml.

#### **8.2.13.2 Determinación de la masa de arena que llena el embudo**

1. Llenar el aparato de densidad con arena, determinar y registrar su masa ( $m_i$ ), aproximando a 1 g.
2. Colocar la placa base sobre una superficie plana, firme y horizontal y asentar el aparato de densidad sobre la placa.
3. Abrir la válvula y mantenerla abierta hasta que la arena deje de fluir.
4. Cerrar totalmente la válvula, determinar y registrar la masa del aparato más la arena remanente ( $m_f$ ), aproximado a 1g.
5. Determinar y registrar la pérdida de masa ( $m_e$ ), como masa de la arena que llena el embudo, aproximado a 1g.  $m_e = m_i - m_f$

#### **8.2.13.3 Determinación de la densidad del suelo en el terreno**

1. Preparar el área donde se va a realizar el ensayo, se elimina todo material suelto, limpiando completamente el área y luego se nivela.
2. Colocar la placa sobre la superficie nivelada.

3. Excavar dentro de la apertura de la placa base un agujero de una profundidad no máximo de 15cm y no menos de 12cm, cuidando de no alterar las paredes del suelo que delimitan el agujero.
4. Colocar todo el suelo excavado en una bolsa y protegerla de pérdidas y contaminaciones.
5. Asentar el aparato de densidad (cono) sobre la placa, abrir la válvula y cerrarla una vez que la arena haya dejado de fluir.
6. Determinar y registrar la masa del aparato de densidad con el total de arena ( $m_i$ ), la masa del aparato más la arena remanente ( $m_f$ ) y la pérdida de masa ( $m_a$ ).  $m_a = m_i - m_f$
7. Recuperar la arena del agujero, tratando de no recoger muchas impurezas y dejarla en un envase aparte hasta acondicionarla a fin de limpiarla previo a utilizarla nuevamente.
8. Inmediatamente de haber extraído todo el material del agujero determinar la masa húmeda ( $m_h$ ), mezclar completamente y mantenerlo protegido en la bolsa, extraer una muestra representativa de ese material y determinar su humedad en laboratorio ( $w$ ).
9. Se calcula la masa seca del material extraído del agujero:

$$m_s = m_h / [1 + (w/100)]$$

Donde

$m_s$  = masa seca del suelo extraído del agujero (g).

$m_h$  = masa húmeda del suelo extraído del agujero (g).

$w$  = humedad del suelo (%)

10. Luego se calcula el volumen del agujero:

$$V_s = (m_a - m_e) / \rho_a$$

Donde

$V_s$  = volumen del agujero ( $\text{cm}^3$ )

$m_a$  = masa de la arena empleada en el ensayo (g)

$m_e$  = masa de la arena que llena el embudo (g).

$\rho_a$  = Densidad aparente de la arena (g/cm<sup>3</sup>)

11. Finalmente calcular la densidad del suelo

$$\rho_d = m_s / V_s$$

Donde

$\rho_d$  = Densidad del suelo seco (g/cm<sup>3</sup>)

$m_s$  = masa seca del suelo extraído del agujero (g).

$V_s$  = volumen del agujero (cm<sup>3</sup>)



Figura 8.23. Determinación de la densidad del suelo utilizando el método del cono de arena

#### 8.2.14 Penetrómetro de mano Eijkelkamp

1. Revisar que la aguja negra y roja del manómetro se encuentre en cero, porque debido a la fricción interna puede no retornar a cero. Si a pesar de

darle vuelta a la perilla para retornar las agujas a cero, esto no sucede, se debe enviar a calibrar el aparato.

2. Seleccionar el cono apropiado para la densidad del suelo esperada.
3. El aparato tiene una desviación estándar de  $\pm 8\%$  en un rango de 200 – 700 N (zona verde del manómetro). En el rango de 100 a 200 N la desviación es de  $\pm 15\%$ . La larga desviación puede ser evitada eligiendo el cono indicado (Figura 8.25).
4. Aplicar una presión uniforme por medio de las agarraderas, de manera que se empuje el cono dentro del suelo a una velocidad de 2 cm/seg.
5. Durante la medición, la resistencia puede ser leída con la aguja negra y la resistencia máxima es indicada con la aguja roja.
6. Cada vez que se tome otra lectura, se ubican ambas agujas en cero.
7. El área de la base del cono se debe anotar, para así poder determinar la resistencia a la penetración

Resistencia a la penetración = lectura del manómetro/ área de la base del cono



Figura 8.24. Penetrómetro de mano Eijkelkamp



Figura 8.25. Rangos de medición del manómetro

#### 8.2.15 Humedad gravimétrica

1. Se refiere a la masa del agua con relación a la masa de suelo seco y se expresa como porcentaje.
2. Tomar la muestra de campo y conservarla inmediatamente en una bolsa plástica sellada, debido a que la humedad puede variar rápidamente luego del muestreo.
3. En el laboratorio se pesa la muestra en una lata especial con tapa  $M_H$  (suelo húmedo).
4. Poner la muestra en una estufa a  $110^{\circ}\text{C}$  por 24h a peso constante y sin tapa.
5. Sacar la muestra de la estufa y poner la tapa, mientras se enfría.
6. Pesar la muestra estando a temperatura ambiente  $M_S$ (suelo seco  $110^{\circ}\text{C}$ ).
7. Calcular la humedad:

$$\%H_g = [(M_H - M_S) / M_S] \times 100$$



### 8.3 Gráficos y datos

#### 8.3.1 Porcentaje de compactación

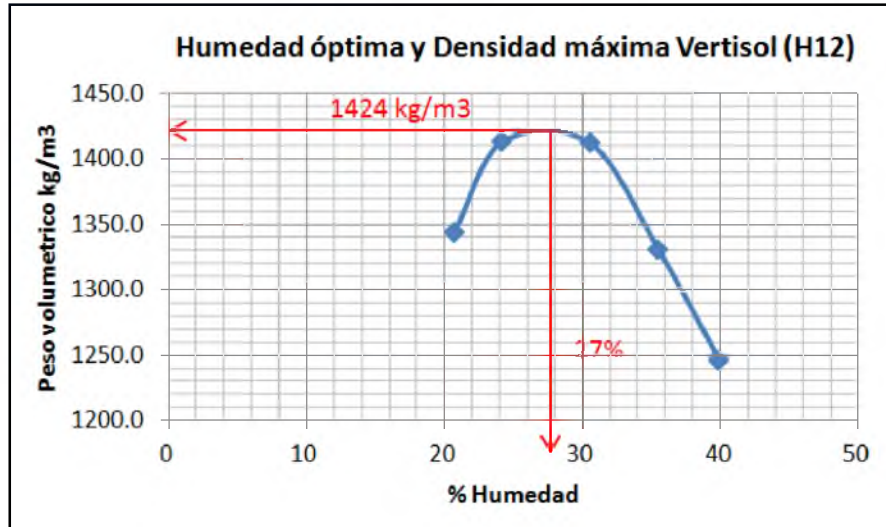


Figura 8.26. Humedad óptima y densidad máxima del Vertisol-Parcela 3

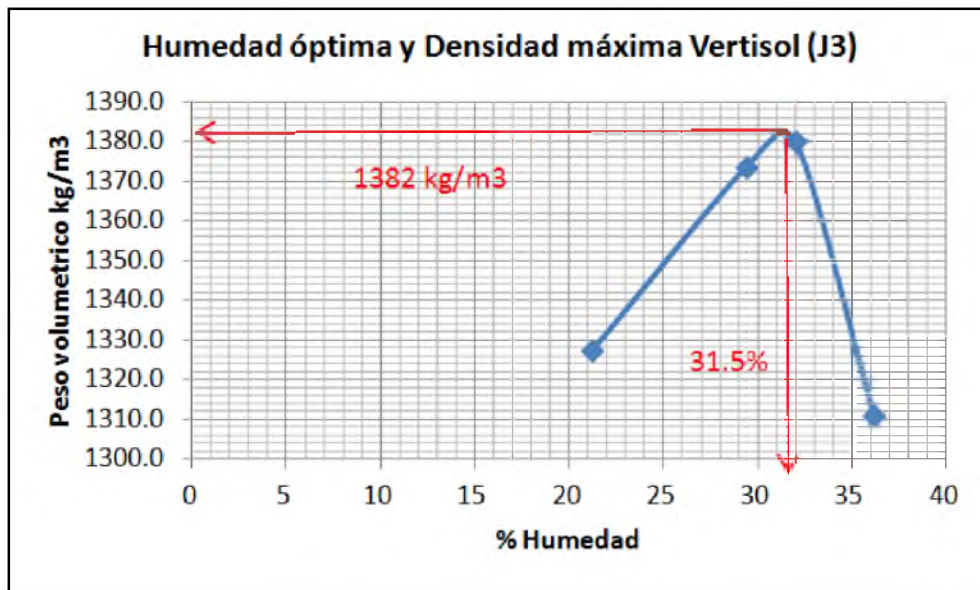


Figura 8.27. Humedad óptima y densidad máxima del Vertisol-Parcela 1

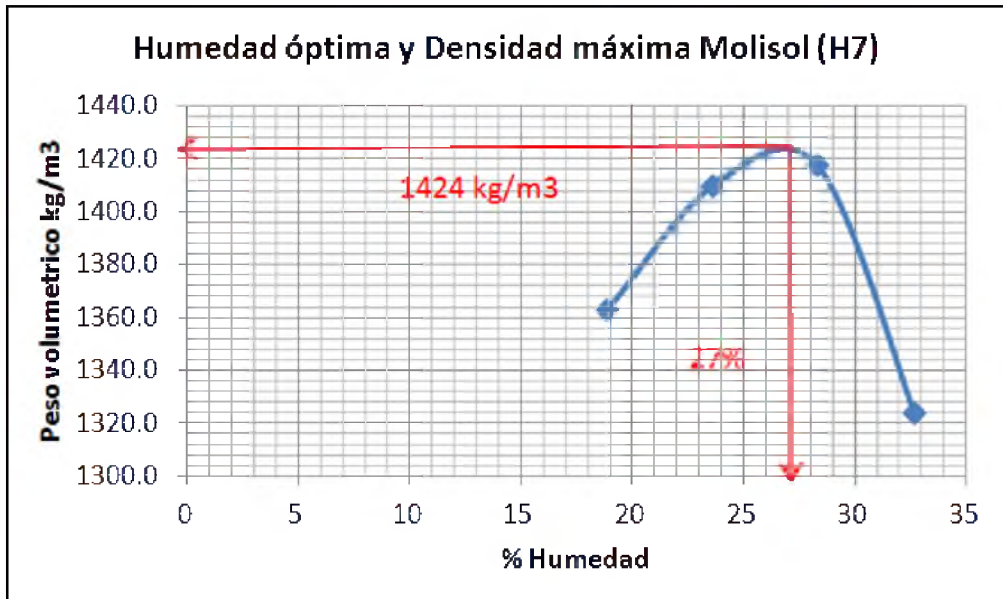


Figura 8.28. Humedad óptima y densidad máxima del Molisol-Parcela 4

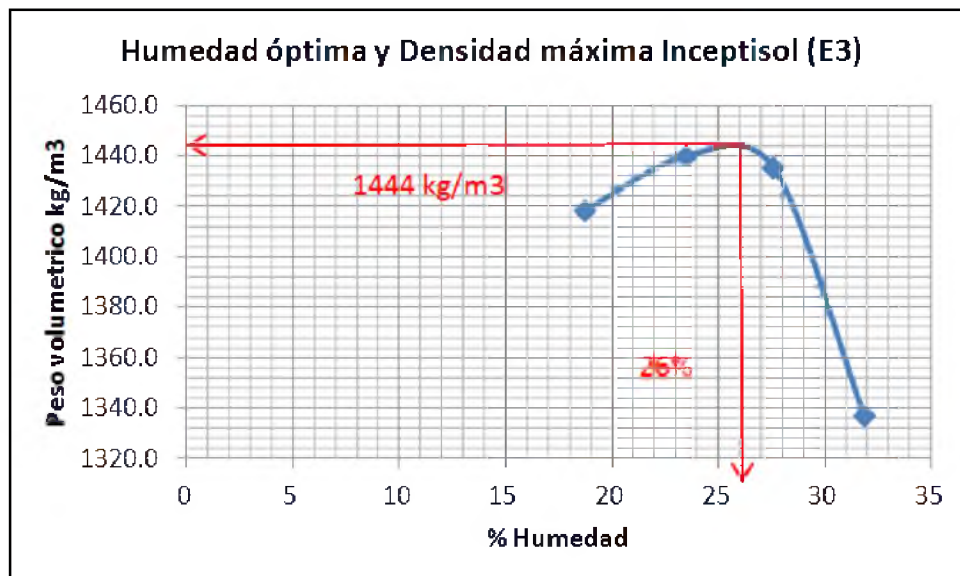


Figura 8.29. Humedad óptima y densidad máxima del Inceptisol-Parcela 2



**TABLA 5 : 2 CONDICIONES PROVISIONALES PARA LA COMPACTACION  
CLASES DE SUELOS DEL SISTEMA UNIFICADO**

Clase de suelo	Compactación requerida—Porcentaje de Proctor Normal Máximo		
	Clase 1	Clase 2	Clase 3
GW	97	94	90
GP	97	94	90
GM	98	94	90
GC	98	94	90
SW	97	95	91
SP	98	95	91
SM	98	95	91
SC	99	96	92
ML	100	96	92
CL	100	96	92
OL	—	96	93
MH	—	97	93
CH	—	—	93
OH	—	97	93
Clase 1	Más de 2.50 m de relleno que soporta edificios de 1 ó 2 pisos Más de 1.00 m de subrasante bajo pavimentos Más de 0.30 m de relleno bajo pisos Presas de tierra de más de 30 m de altura		
Clase 2	Partes más profundas de rellenos bajo edificios Partes más profundas (hasta 10 m) de relleno bajo pavimentos o pisos Presas de tierra de menos de 30 m de altura		
Clase 3	Todos los demás rellenos que requieran algún grado de resistencia o incompresibilidad		

Figura 8.30. Condiciones provisionales para la compactación (Clases de suelo del sistema unificado)

Fuente: Sowers & Sowers, 1972

### 8.3.2 Resistencia a la penetración

Clases de Resistencia a la Penetración	
Clases	Resistencia a la Penetración (MPa)
Pequeña	<0.1
Extremadamente baja	<0.01
Muy baja	0.01-0.1
Media	0.1-2
Baja	0.1-1
Moderada	1-2
Larga	>2
Alta	2-4
Muy alta	4-8
Extremadamente alta	≥8

Figura 8.31. Clases de resistencia a la penetración  
Fuente: Soil Survey Staff, 1993

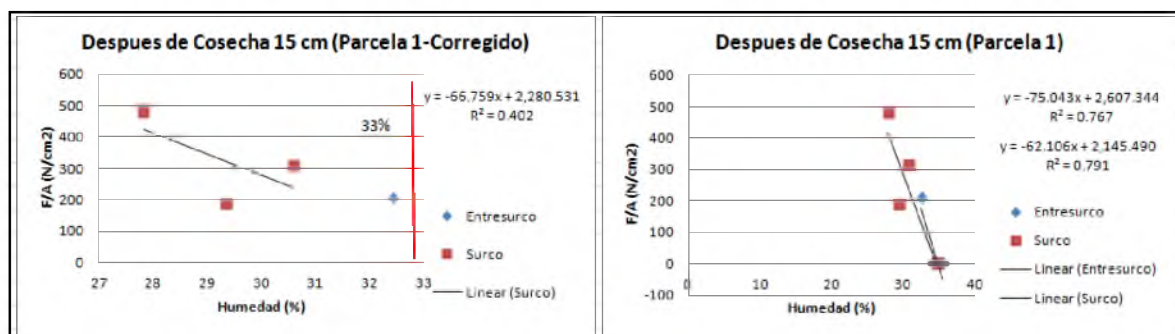


Figura 8.32. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 1, después de cosecha a 15 cm de profundidad

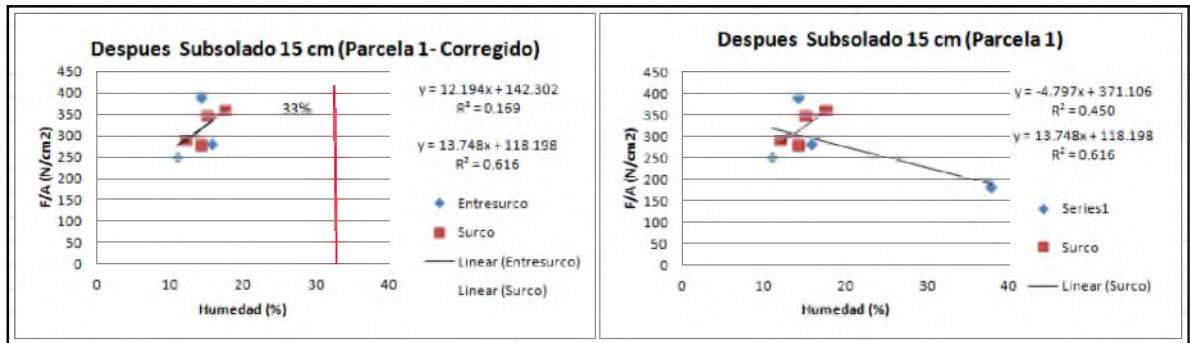


Figura 8.33. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 1, después de subsulado a 15 cm de profundidad

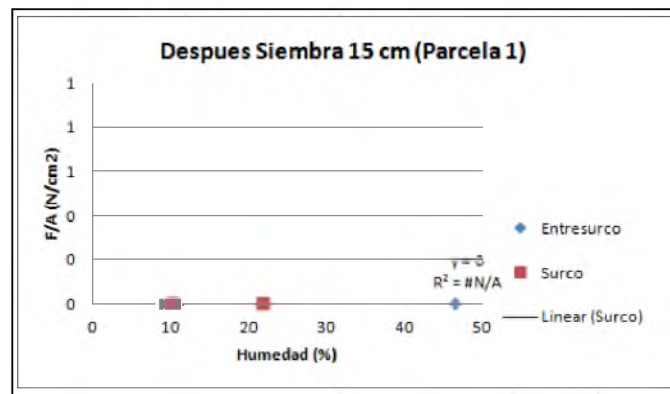


Figura 8.34. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 1, después de siembra a 15 cm de profundidad

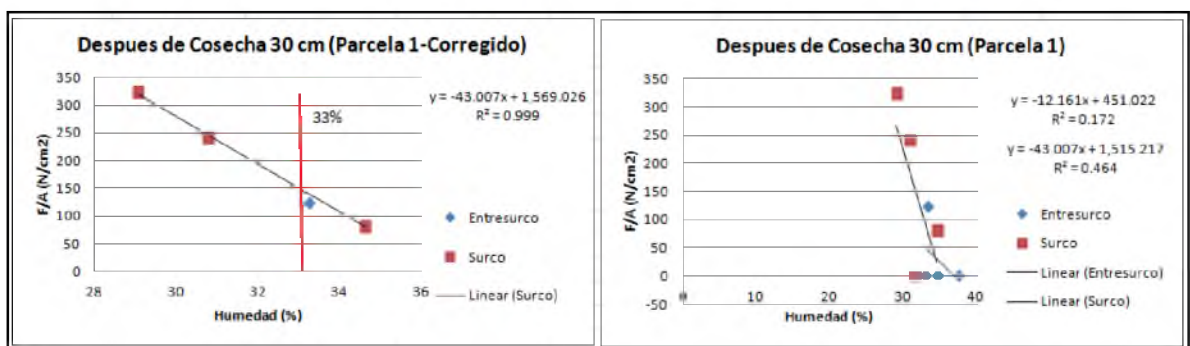


Figura 8.35. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 1, después de cosecha a 30 cm de profundidad

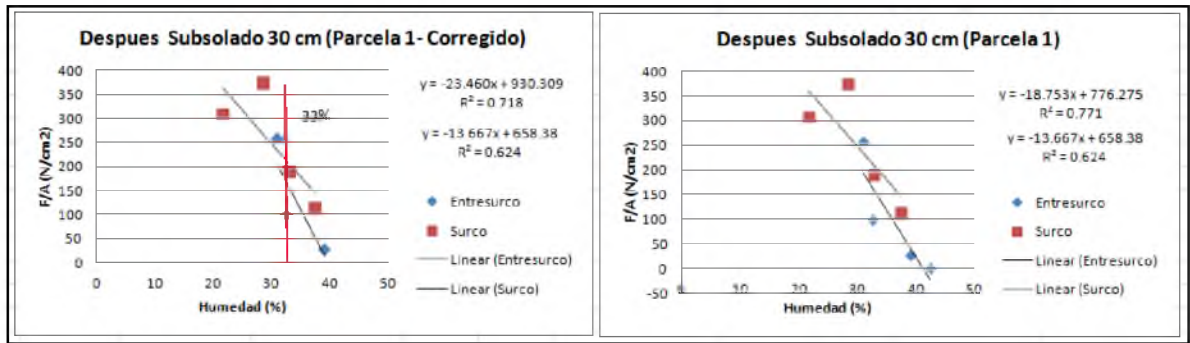


Figura 8.36. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 1, después de subsulado a 30 cm de profundidad

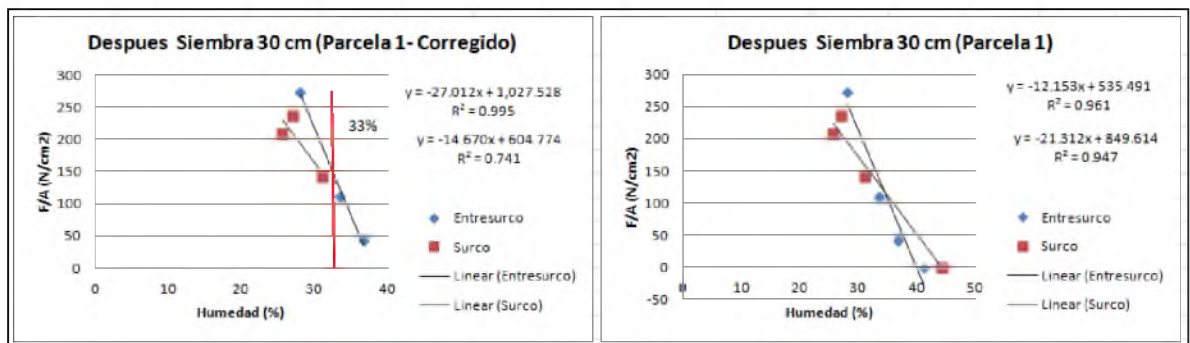


Figura 8.37. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 1, después de siembra a 30 cm de profundidad

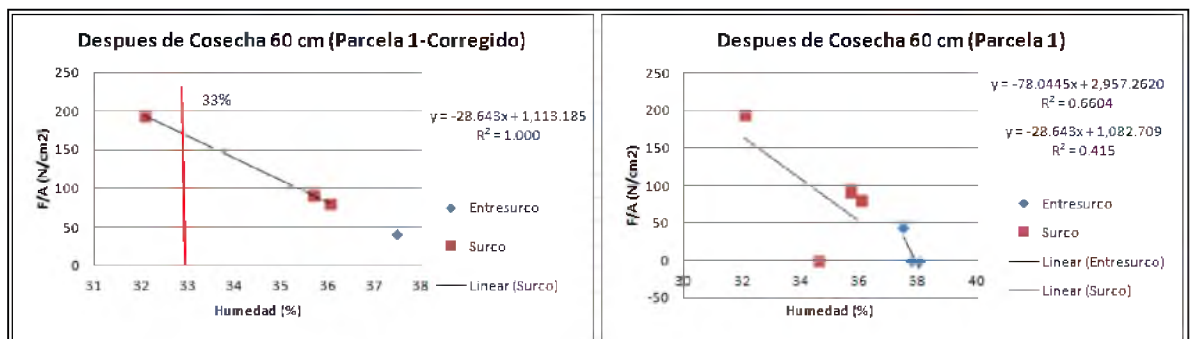


Figura 8.38. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 1, después de cosecha a 60 cm de profundidad

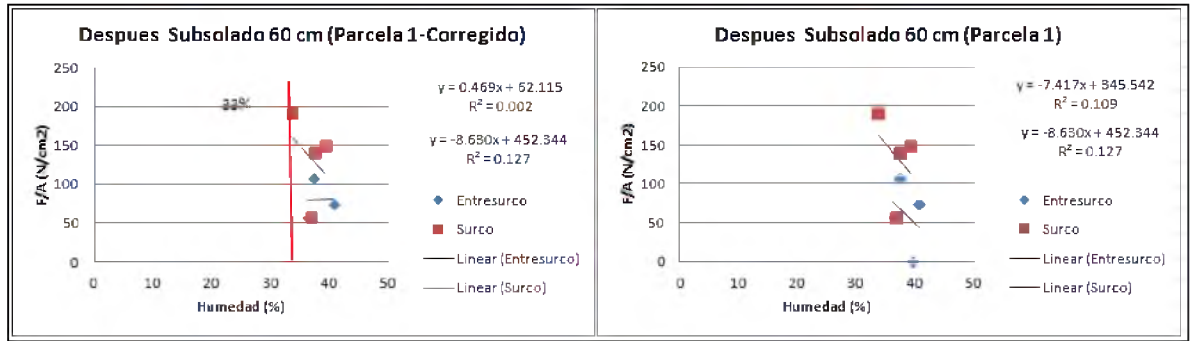


Figura 8.39. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 1, después de subsolado a 60 cm de profundidad

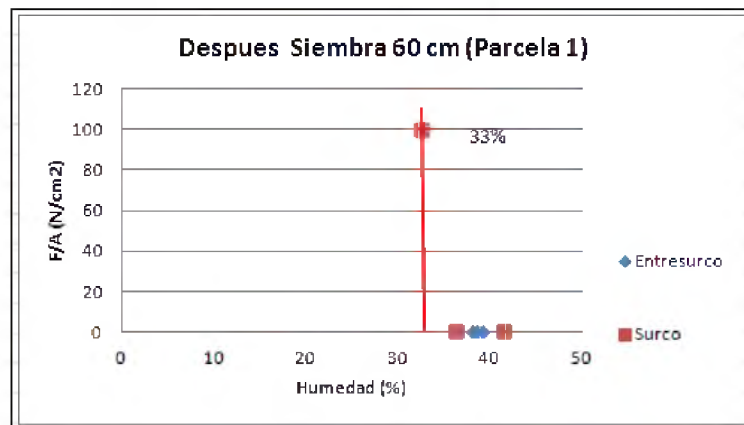


Figura 8.40. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 1, después de siembra a 60 cm de profundidad

Cuadro 8.2. Datos seleccionados para análisis de Resistencia a la Penetración de la Parcela 1

Momento	Profundidad (cm)	ENTRESURCO			SURCO		
		Resistencia (N/cm <sup>2</sup> )	R <sup>2</sup> ó % Humedad	Resistencia corregida (Mpa)	Resistencia (N/cm <sup>2</sup> )	R <sup>2</sup> ó % Humedad	Resistencia corregida (Mpa)
Después Cosecha	15	210	32%	2.1	NOC	NOC	NOC
Después Subsulado	15	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC
Después Siembra	15	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC
Después Cosecha	30	123	33%	1.23	$y = -43.007x + 1569$	0.999	1.50
Después Subsulado	30	99	33%	0.99	190	33%	1.90
Después Siembra	30	$y = -27.012x + 1027.5$	0.9945	1.36	$y = -14.67x + 604.77$	0.7406	1.21

Después Cosecha	60	NOC	NOC	NOC	194	32%	1.94
Después Subsulado	60	NOC	NOC	NOC	191	34%	1.91
Después Siembra	60	NOC	NOC	NOC	100	33%	1.00

\*NOC:No se obtuvo correlación

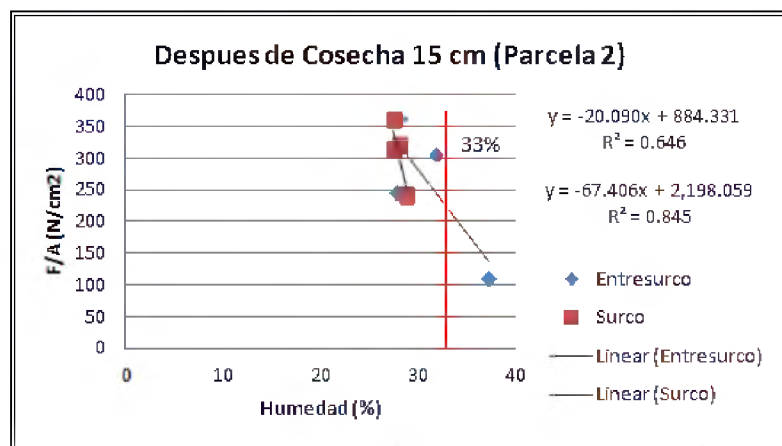


Figura 8.41. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 2, después de cosecha a 15 cm de profundidad

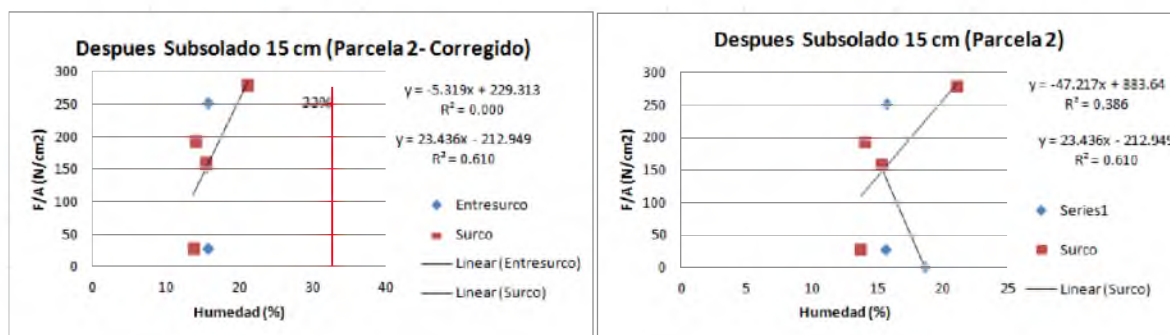


Figura 8.42. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 2, después de subsulado a 15 cm de profundidad

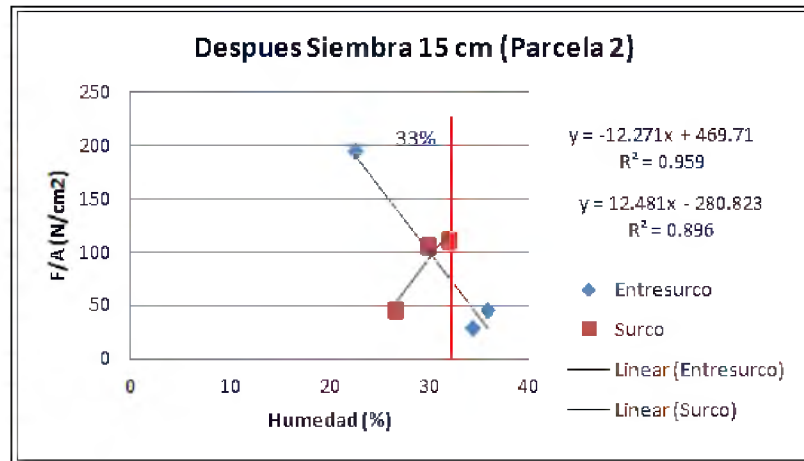


Figura 8.43. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 2, después de siembra a 15 cm de profundidad

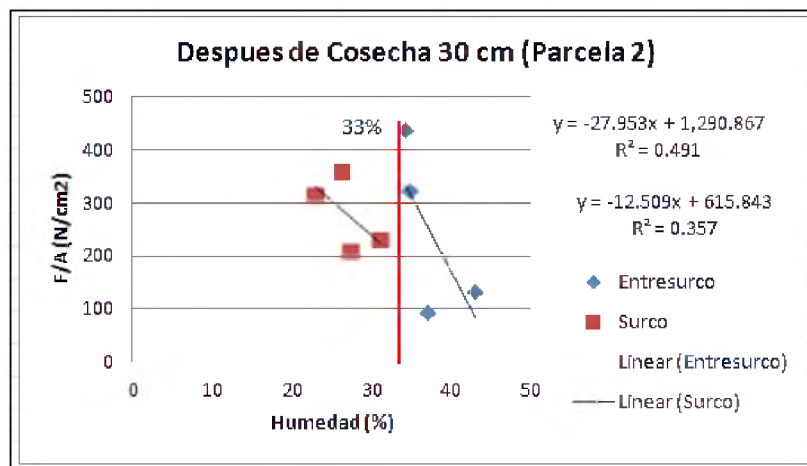


Figura 8.44. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 2, después de cosecha a 30 cm de profundidad

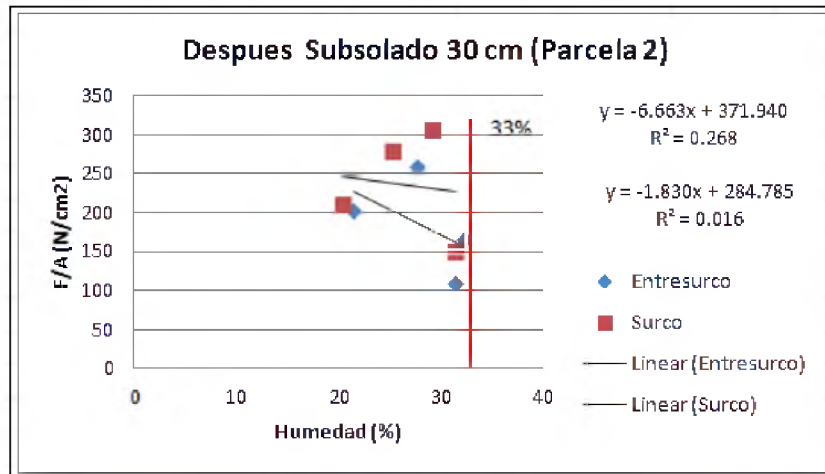


Figura 8.45. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 2, después de subsolado a 30 cm de profundidad

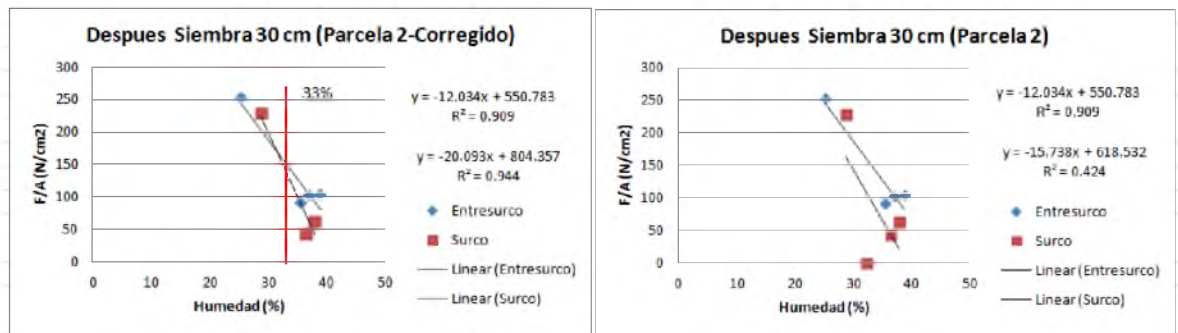


Figura 8.46. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 2, después de siembra a 30 cm de profundidad

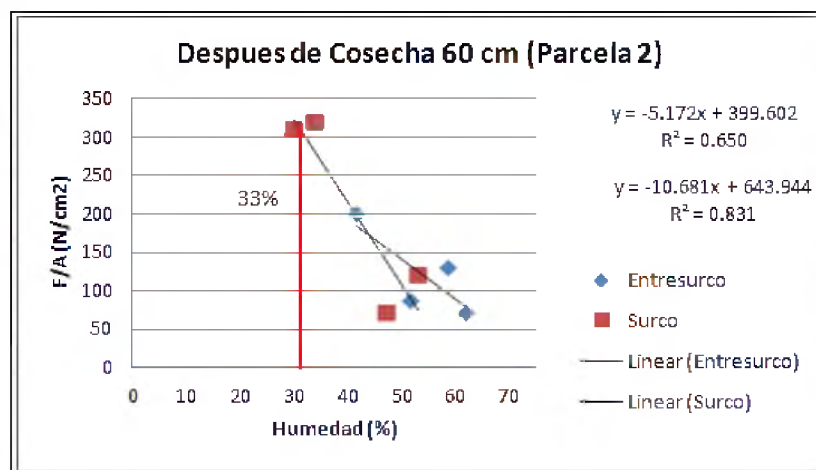


Figura 8.47. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 2, después de cosecha a 60 cm de profundidad



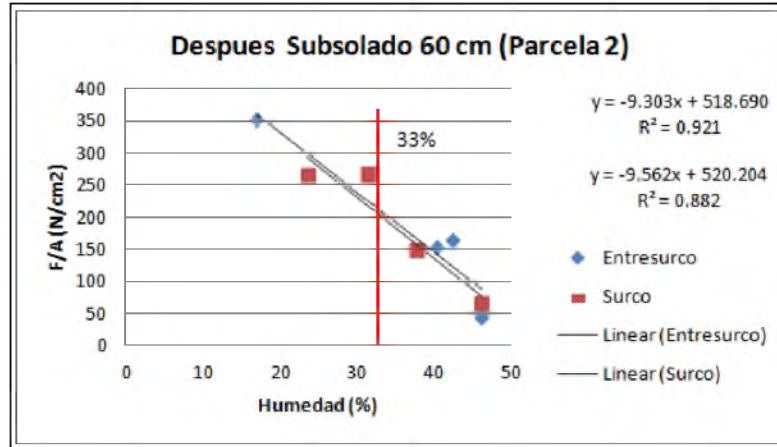


Figura 8.48. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 2, después de subsolado a 60 cm de profundidad

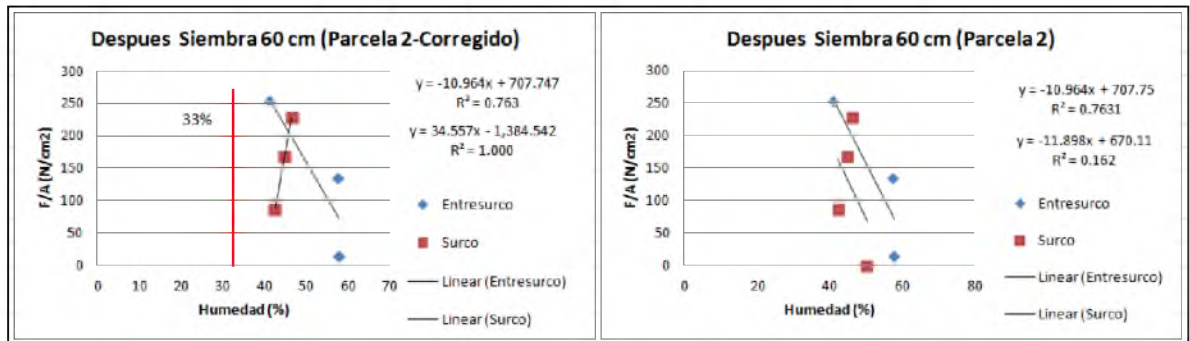


Figura 8.49. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 2, después de siembra a 60 cm de profundidad

Cuadro 8.3. Datos seleccionados para análisis de Resistencia a la Penetración de la Parcela 2

Momento	Profundidad (cm)	ENTRESURCO			SURCO		
		Resistencia (N/cm <sup>2</sup> )	R <sup>2</sup> ó % Humedad	Resistencia corregida (Mpa)	Resistencia (N/cm <sup>2</sup> )	R <sup>2</sup> ó % Humedad	Resistencia corregida (Mpa)
Después Cosecha	15	304	32%	3.04	NOC	NOC	NOC
Después Subsulado	15	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC
Después Siembra	15	$y = -12.271x + 469.71$	0.959	0.65	111	32%	1.11
Después Cosecha	30	437	34%	4.37	NOC	NOC	NOC
Después Subsulado	30	166	32%	1.66	NOC	NOC	NOC
Después Siembra	30	$y = -12.034x + 550.78$	0.9094	1.54	$y = -20.093x + 804.36$	0.9445	1.41
Después Cosecha	60	$y = -5.1724x + 399.6$	0.6503	2.29	320	34%	3.2
Después Subsulado	60	$y = -9.3026x + 518.69$	0.9260	2.12	267	32%	2.67
Después Siembra	60	$y = -10.964x + 707.75$	0.7631	3.46	NOC	NOC	NOC

\*NOC: No se obtuvo correlación

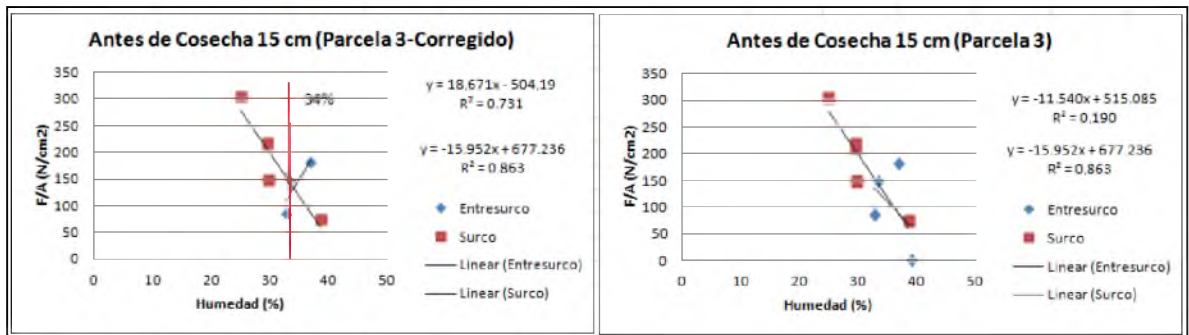


Figura 8.50. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 3, antes de cosecha a 15 cm de profundidad

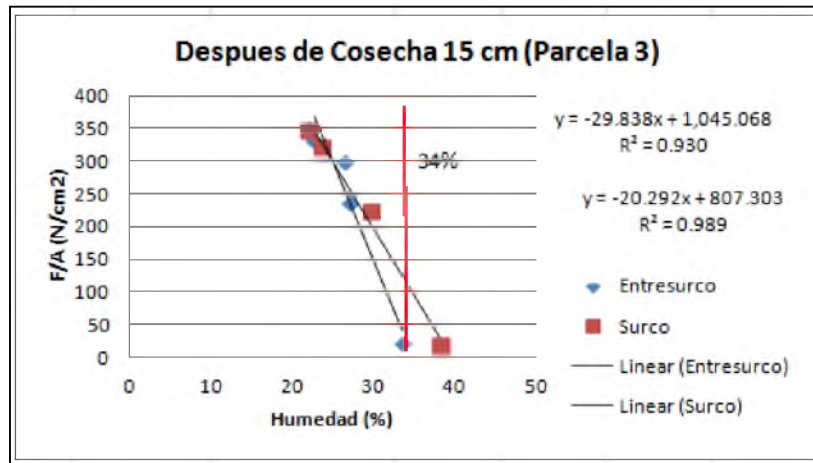


Figura 8.51. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 3, después de cosecha a 15 cm de profundidad

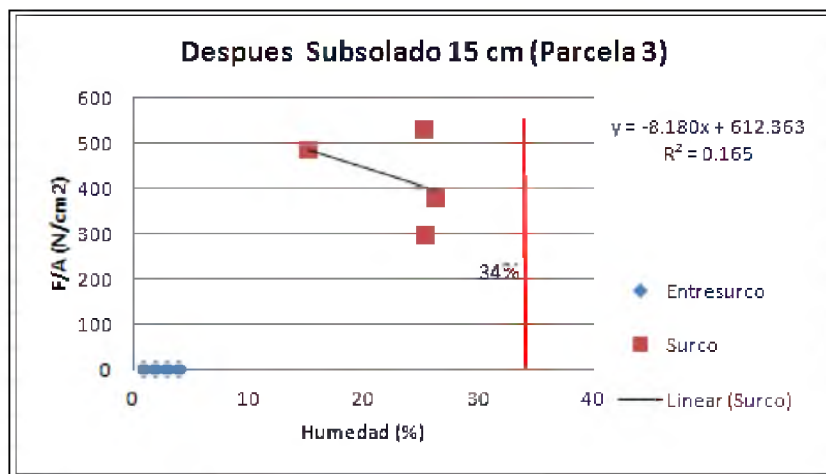


Figura 8.52. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 3, después de subsolado a 15 cm de profundidad

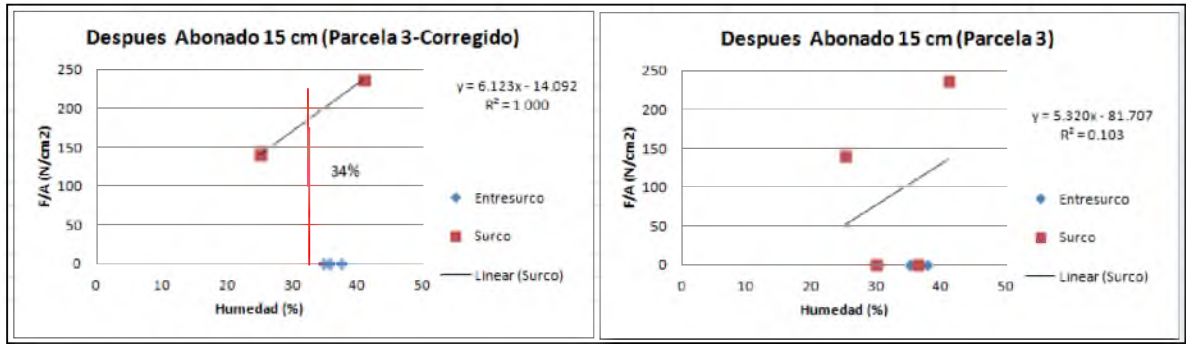


Figura 8.53. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 3, después de abonado a 15 cm de profundidad

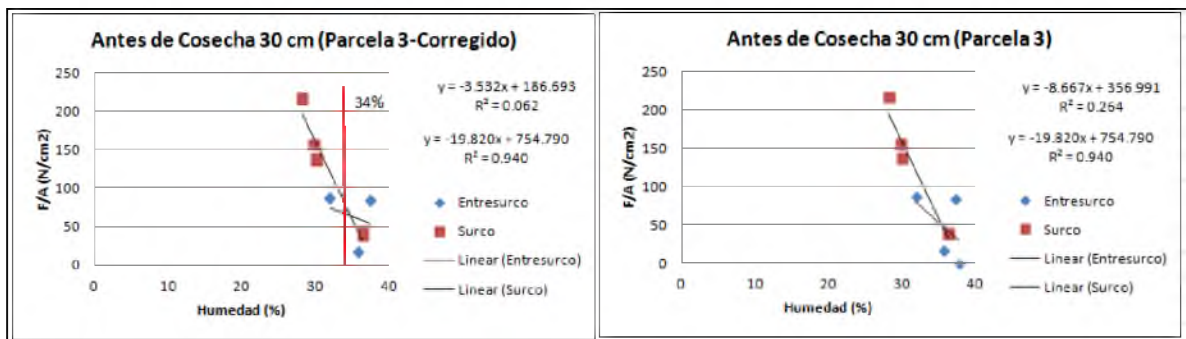


Figura 8.54. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 3, antes de cosecha a 30 cm de profundidad

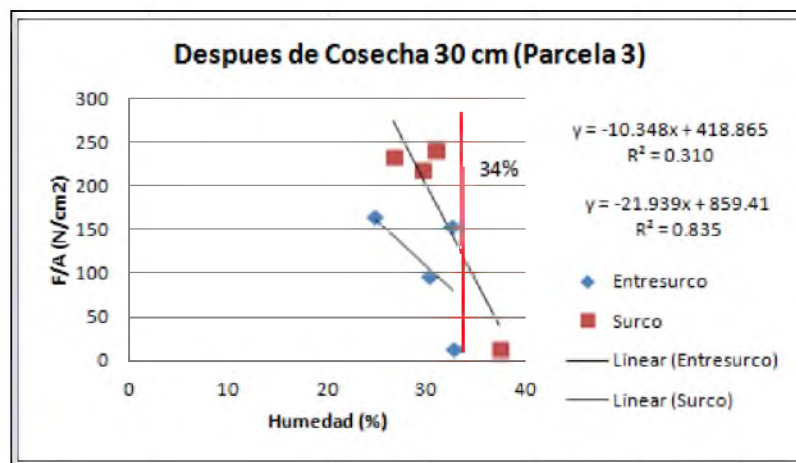


Figura 8.55. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 3, después de cosecha a 30 cm de profundidad

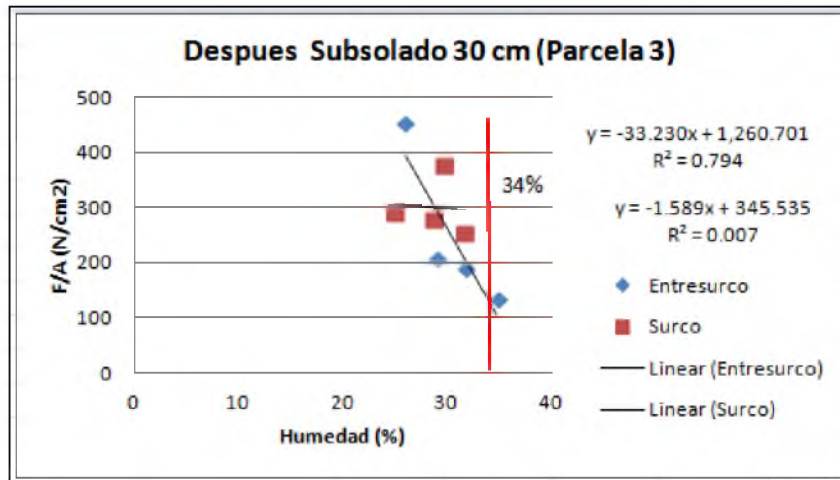


Figura 8.56. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 3, después de subsolado a 30 cm de profundidad

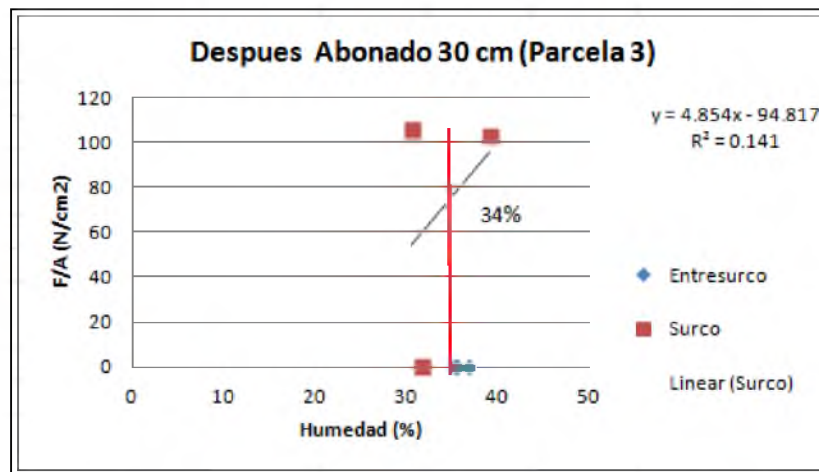


Figura 8.57. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 3, después de abonado a 30 cm de profundidad

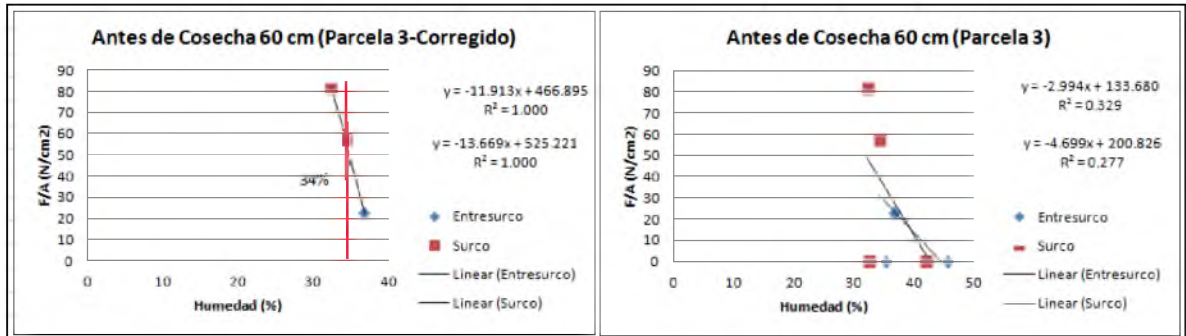


Figura 8.58. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 3, antes de cosecha a 60 cm de profundidad

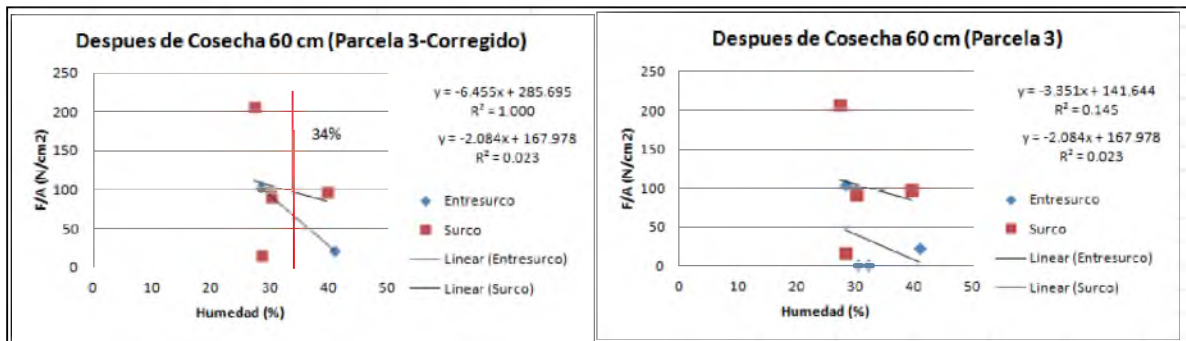


Figura 8.59. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 3, después de cosecha a 60 cm de profundidad

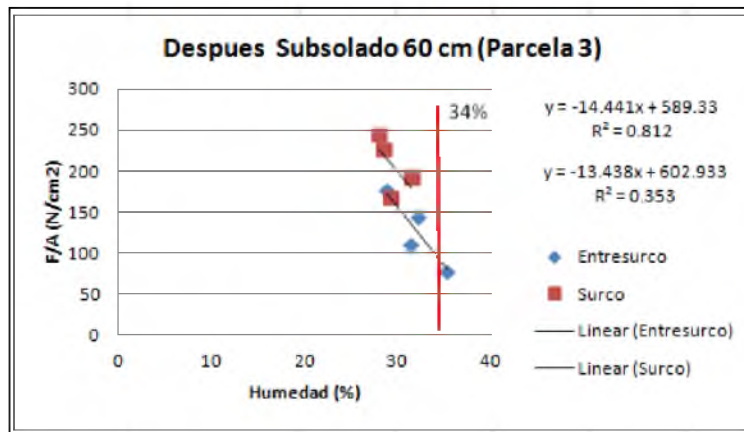


Figura 8.60. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 3, después de subsulado a 60 cm de profundidad

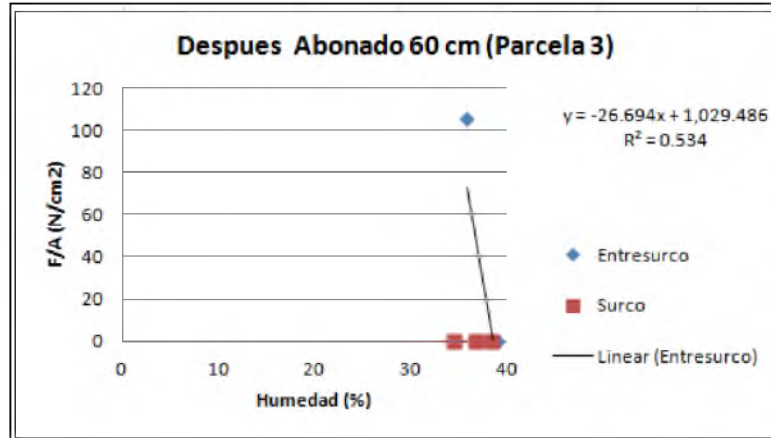


Figura 8.61. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 3, después de abonado a 60 cm de profundidad

Cuadro 8.4. Datos seleccionados para análisis de Resistencia a la Penetración de la Parcela 3

Momento	Profundidad (cm)	ENTRESURCO			SURCO		
		Resistencia (N/cm2)	R <sup>2</sup> ó % Humedad	Resistencia corregida (Mpa)	Resistencia (N/cm2)	R <sup>2</sup> ó % Humedad	Resistencia corregida (Mpa)
Antes de cosecha	15	149	34%	1.49	$y = -15.952x + 677.24$	0.8633	1.35
Después Cosecha	15	NOC	NOC	NOC	$y = -20.292x + 807.3$	0.9894	1.17
Después Subsulado	15	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC
Después Abonado	15	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC
Antes de cosecha	30	NOC	0.0624	NOC	$y = -19.82x + 754.79$	0.9396	0.81
Después Cosecha	30	154	33%	1.54	$y = -21.939x + 859.41$	0.835	1.13
Después Subsulado	30	134	35%	1.34	NOC	0.0069	NOC
Después Abonado	30	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC
Antes de cosecha	60	57	34%	0.57	57	34%	0.57
Después Cosecha	60	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC
Después Subsulado	60	79	35%	0.79	NOC	0.3527	NOC
Después Abonado	60	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC

\*NOC: No se obtuvo correlación



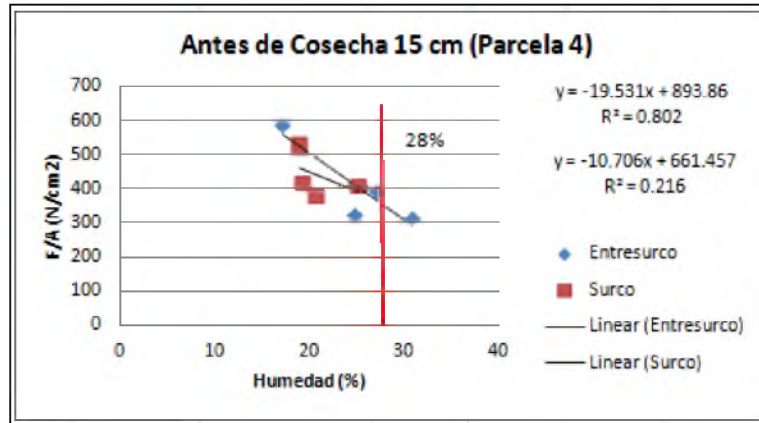


Figura 8.62. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 4, antes de cosecha a 15 cm de profundidad

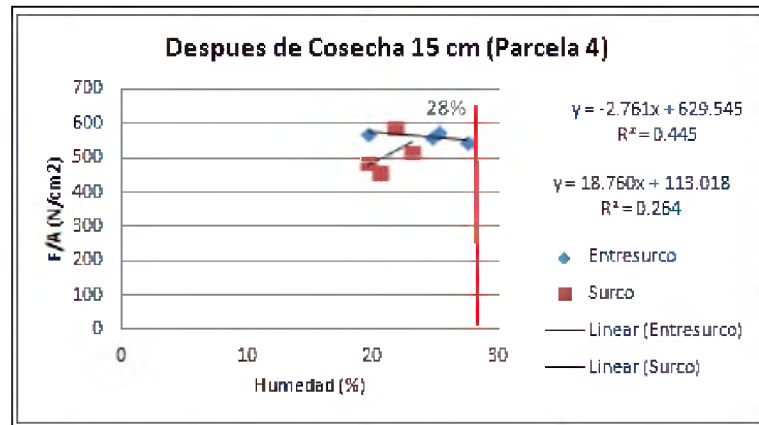


Figura 8.63. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 4, después de cosecha a 15 cm de profundidad



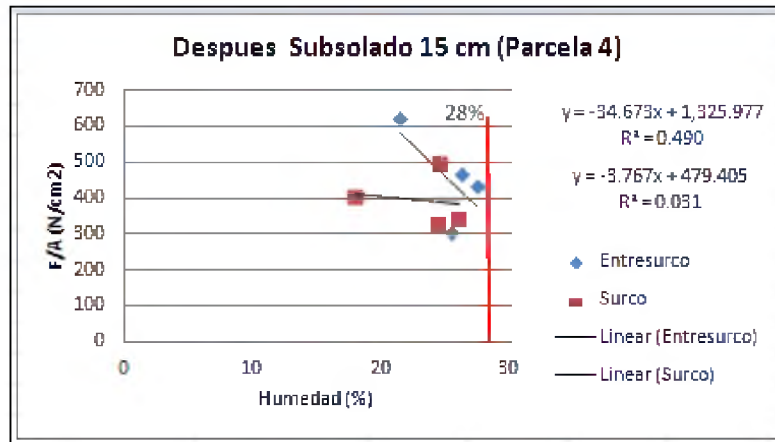


Figura 8.64. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 4, después de subsolado a 15 cm de profundidad

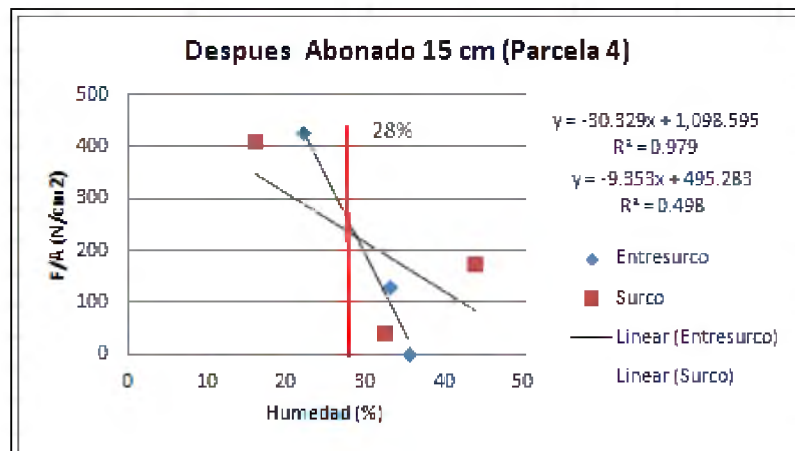


Figura 8.65. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 4, después de abonado a 15 cm de profundidad

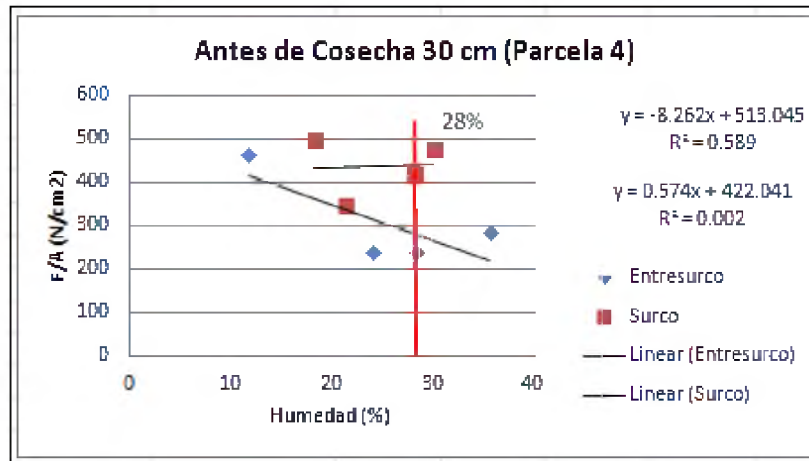


Figura 8.66. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 4, antes de cosecha a 30 cm de profundidad

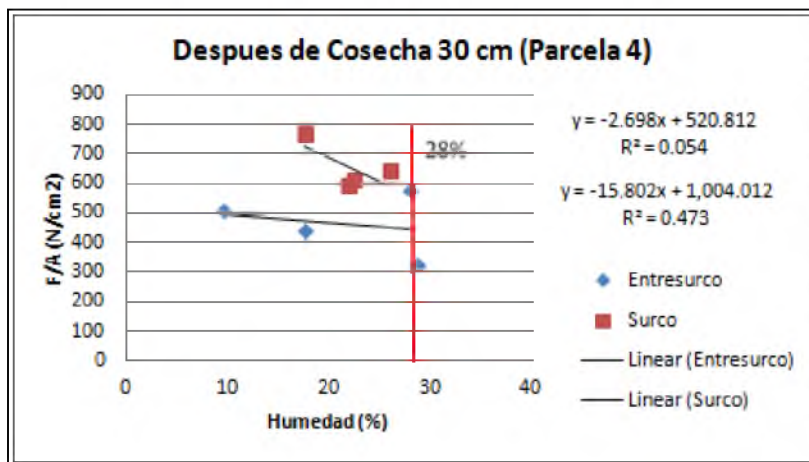


Figura 8.67. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 4, después de cosecha a 30 cm de profundidad

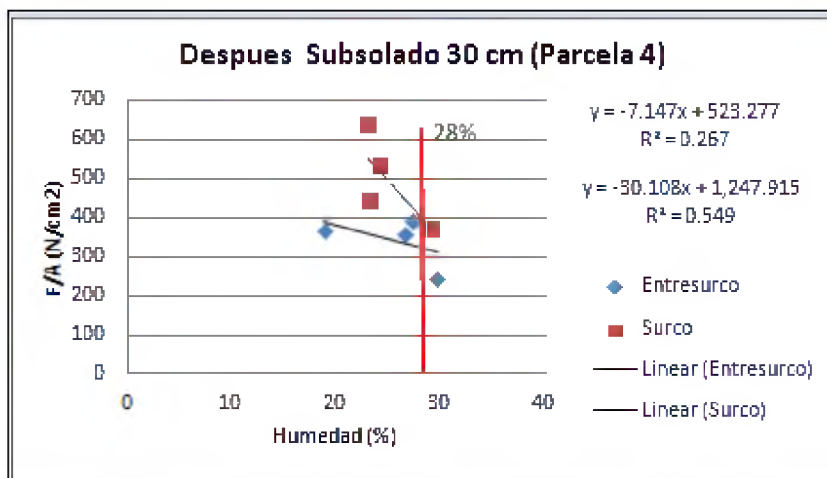


Figura 8.68. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 4, después de subsolado a 30 cm de profundidad

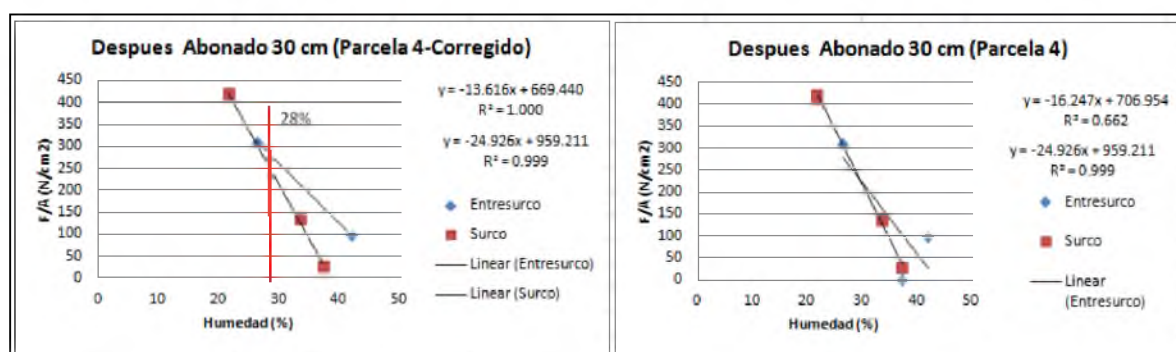


Figura 8.69. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 4, después de abonado a 30 cm de profundidad

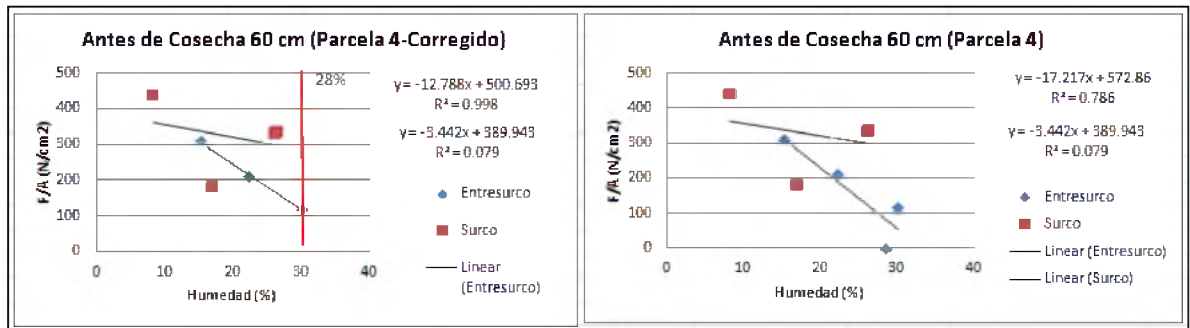


Figura 8.70. Gráfico con datos originales (Derecha) y gráfico con datos seleccionados (Izquierdo) de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 4, antes de cosecha a 60 cm de profundidad

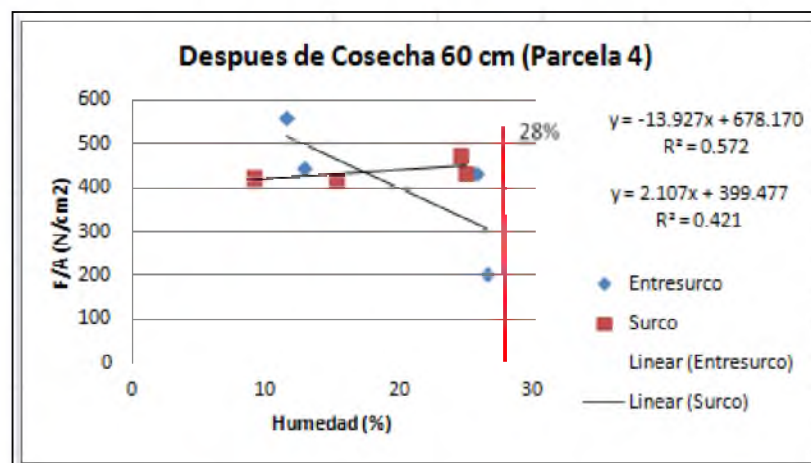


Figura 8.71. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 4, después de cosecha a 60 cm de profundidad

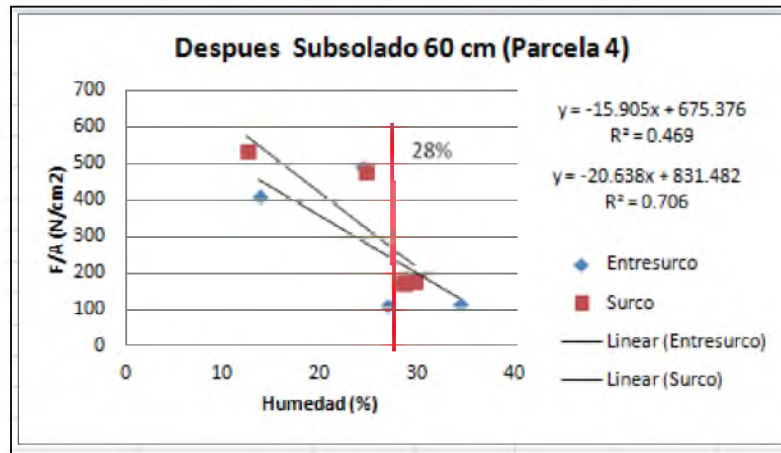


Figura 8.72. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 4, después de subsolado a 60 cm de profundidad

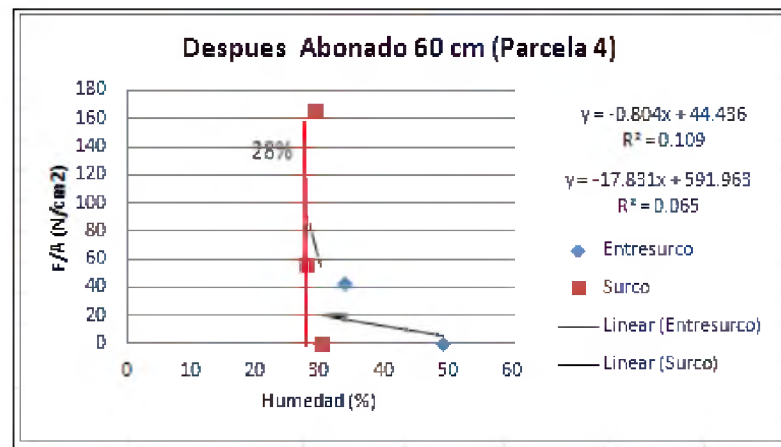


Figura 8.73. Gráfico con datos originales de Resistencia a la Penetración de entresurco y surco de la Parcela 4, después de abonado a 60 cm de profundidad

Cuadro 8.5. Datos seleccionados para análisis de Resistencia a la Penetración de la Parcela 4

Momento	Profundidad (cm)	ENTRESURCO			SURCO		
		Resistencia (N/cm <sup>2</sup> )	R <sup>2</sup> ó % Humedad	Resistencia corregida (Mpa)	Resistencia (N/cm <sup>2</sup> )	R <sup>2</sup> ó % Humedad	Resistencia corregida (Mpa)
Antes de cosecha	15	396	27%	3.96	NOC	0.2158	NOC
Después Cosecha	15	544	27%	5.44	NOC	0.2637	NOC
Después Subsulado	15	431	27%	4.31	NOC	0.0306	NOC
Después Abonado	15	$y = -30.329x + 1098.6$	0.9793	2.49	NOC	0.4977	NOC
Antes de cosecha	30	239	28%	2.39	421	28%	4.21
Después Cosecha	30	577	28%	5.77	NOC	0.4732	NOC
Después Subsulado	30	391	27%	3.91	371	29%	3.71
Después Abonado	30	$y = -13.616x + 669.44$	1	2.88	$y = -24.926x + 959.21$	0.9987	2.61
Antes de cosecha	60	$y = -12.788x + 500.69$	0.9976	1.43	NOC	0.0789	NOC
Después Cosecha	60	$y = -13.927x + 678.17$	0.5716	2.88	NOC	0.4211	NOC
Después Subsulado	60	111	27%	1.11	171	29%	1.71
Después Abonado	60	57	28%	0.57	NOC	0.1092	NOC

\*NOC: No se obtuvo correlación

### 8.3.3 Curvas de consolidación

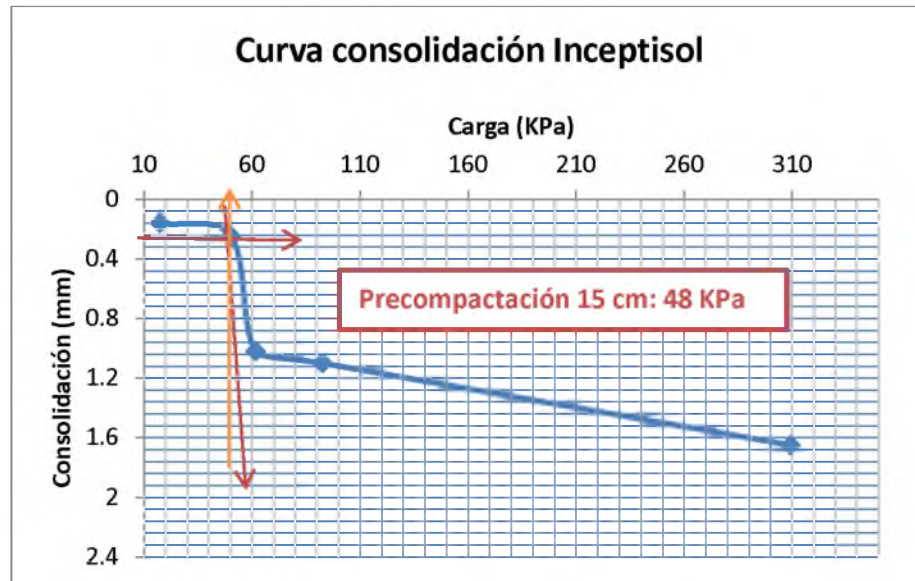


Figura 8.74. Curva de consolidación del Inceptisol a 15 cm de profundidad

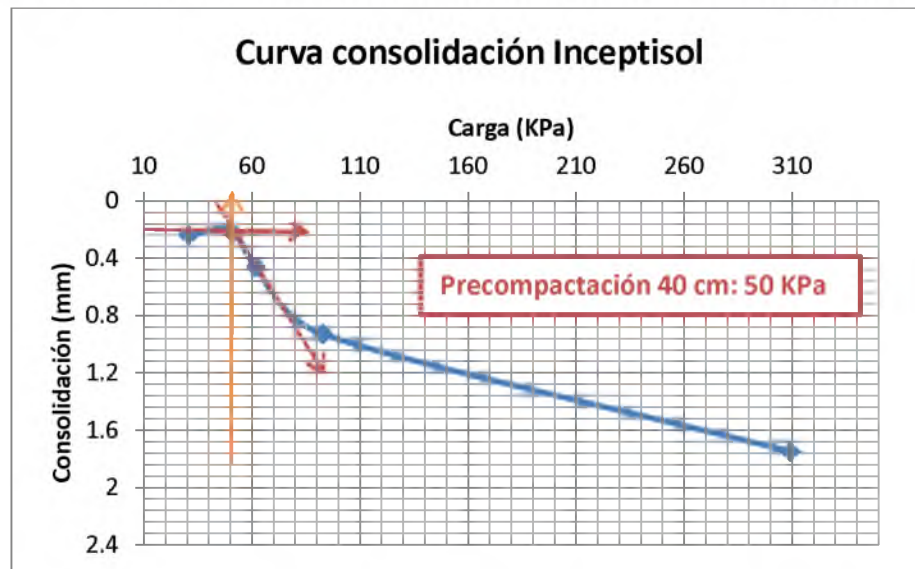


Figura 8.75. Curva de consolidación del Inceptisol a 30 cm de profundidad

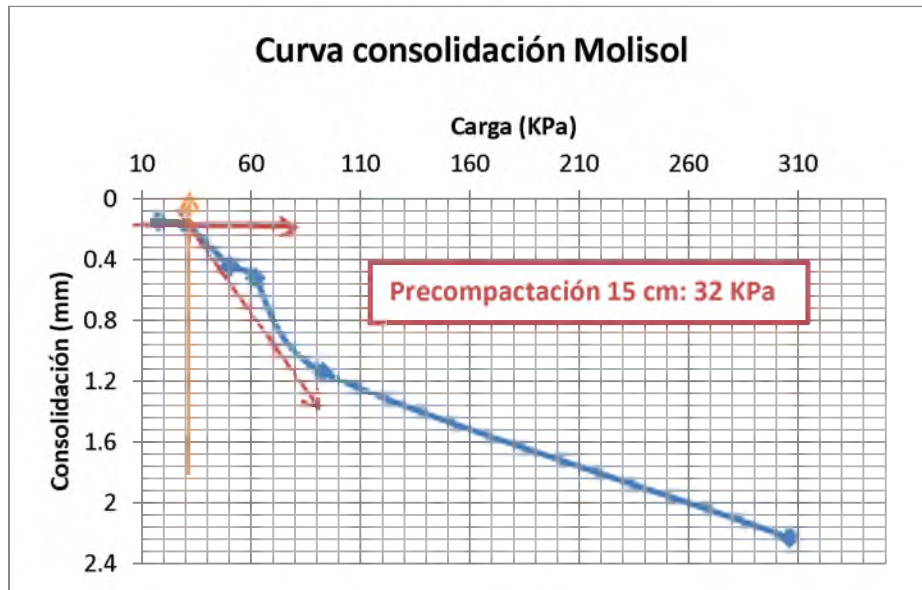


Figura 8.76. Curva de consolidación del Molisol a 15 cm de profundidad

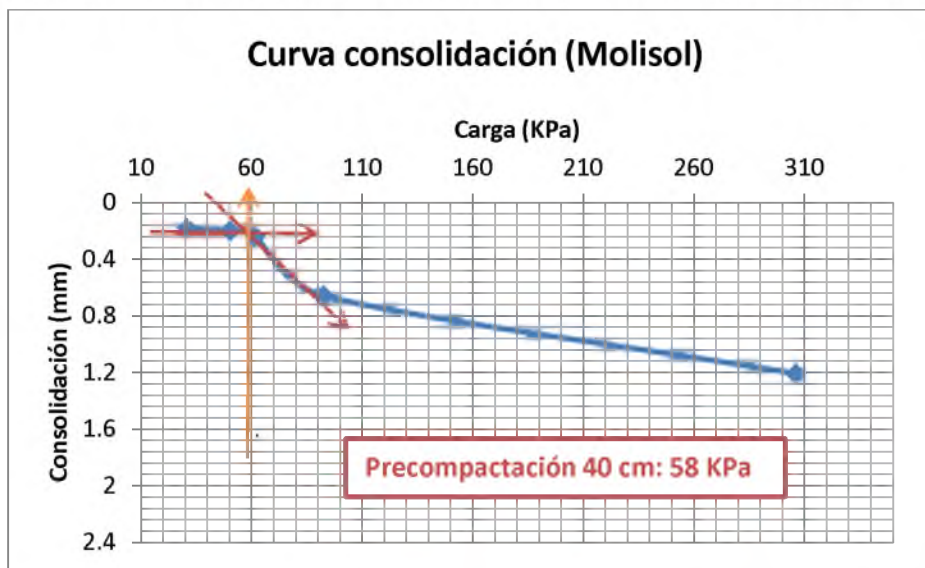


Figura 8.77. Curva de consolidación del Molisol a 30 cm de profundidad



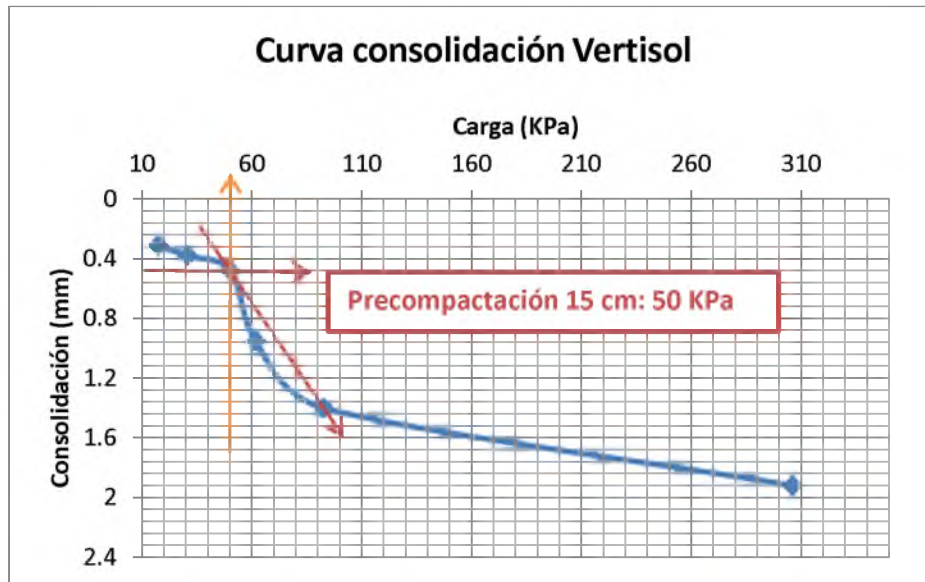


Figura 8.78. Curva de consolidación del Vertisol a 15 cm de profundidad

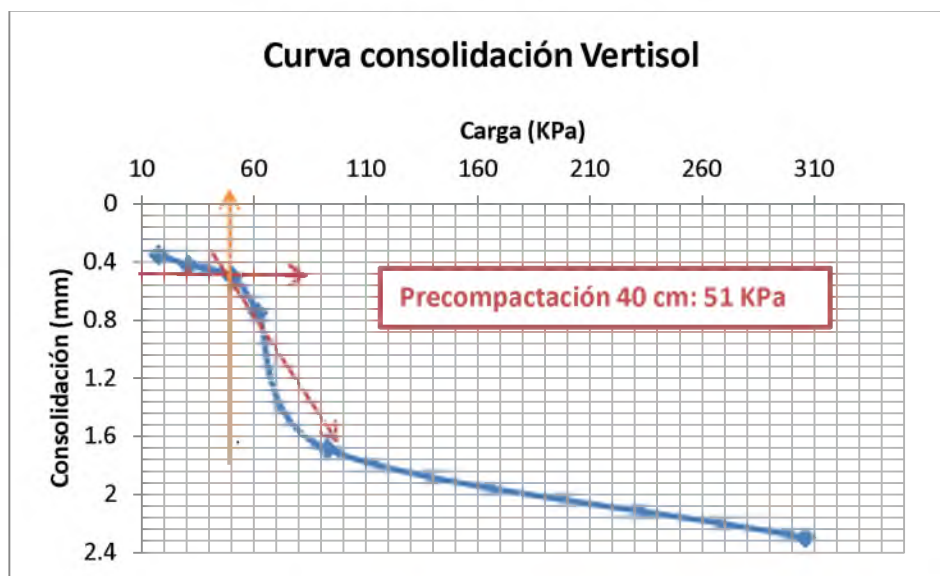


Figura 8.79. Curva de consolidación del Vertisol a 30 cm de profundidad

### 8.3.4 Curvas de Retención de Humedad del Suelo

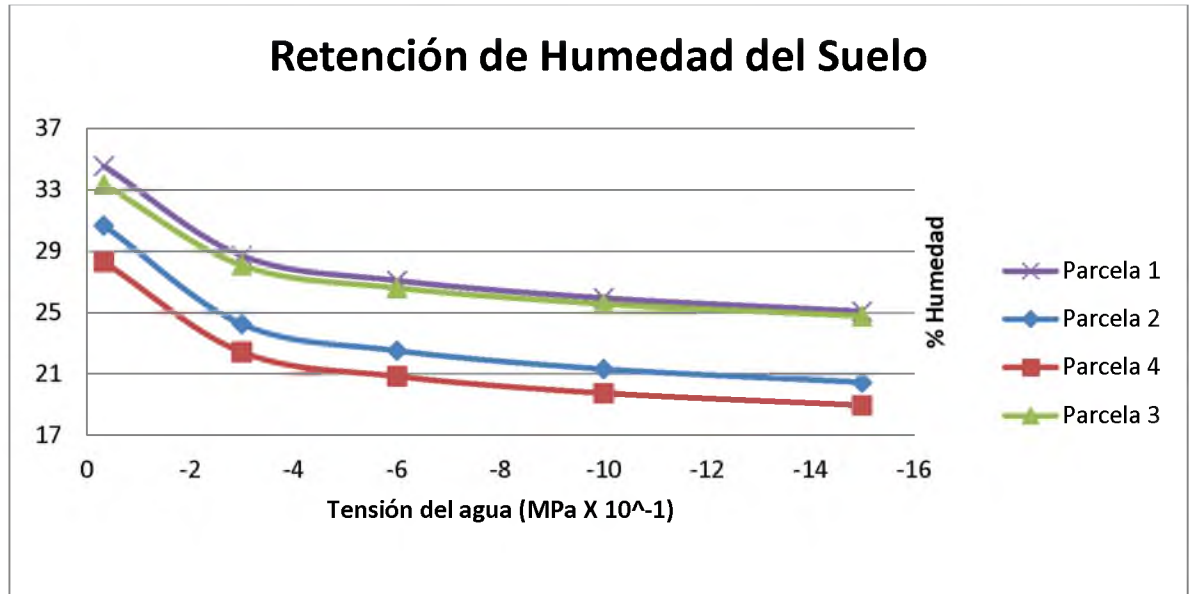


Figura 8.80. Curvas de Retención de Humedad de los diferentes tipos de suelo

### 8.3.5 Datos de Maquinaria

Cuadro 8.6. Maquinaria utilizada en el lote H7- Liberianos (Parcela 4)

Fecha Inicio	Fecha Fin	Tipo de Labor	Actividad	Propietario	Maquina	Implemento	Total Horas	Pases	Rendimiento
23/03/2011	23/03/2011	Cosecha	Cosecha	Taboga	A-9	175 Autovolteo		1	66.93 ton/ha
23/03/2011	23/03/2011	Cosecha	Cosecha	Taboga	A-1			1	66.93 ton/ha
06/04/2011	07/04/2011	Subsolado	Subsolado	Taboga	503	E-16	11	1	1 ha/h
08/04/2011	08/04/2011	Preparación	Tapado de semilla	AGROMECC	A-67	T-42	3	1	1 ha/h
07/05/2011	08/05/2011	Abono	Abono	AGROMECC	A-94	A-23	2,5	1	1 ha/h
08/05/2011	08/05/2011	Abono	Abono	AGROMECC	A-60		3,3	1	1 ha/h
08/05/2011	08/05/2011	Abono	Abono	AGROMECC	A-59		3,3	1	1 ha/h
08/05/2011	08/05/2011	Abono	Abono	AGROMECC	A-50		3	1	1 ha/h
17/05/2011	18/05/2011	Conformación Surco	Conformación Surco	AGROMECC	A-92	I-02	?	1	1.3 ha/h

Cuadro 8.7. Maquinaria utilizada en el lote H12- Hortigal (Parcela 3)

Fecha Inicio	Fecha Fin	Tipo de Labor	Actividad	Propietario	Maquina	Implemento	Total Horas	Pases	Rendimiento
25/02/2011	25/02/2011	Cosecha	Cosecha	Taboga	A-1	55 Autovolteo		1	31.84 ton/ha
25/02/2011	25/02/2011	Cosecha	Cosecha	Taboga	A-2			1	31.84 ton/ha
25/02/2011	25/02/2011	Cosecha	Cosecha	Taboga	A-6			1	31.84 ton/ha
03/03/2011	03/03/2011	Cosecha	Cosecha	Taboga	A-2			1	31.84 ton/ha
03/03/2011	03/03/2011	Cosecha	Cosecha	Taboga	A-4			1	31.84 ton/ha
03/03/2011	03/03/2011	Cosecha	Cosecha	Taboga	A-6			1	31.84 ton/ha
21/03/2011	22/03/2011	Subsolado	Subsolado	Taboga	503	S-58		1	0.87 ha/h
25/04/2011	25/04/2011	Conformación Surco	Conformación Surco	AGROMECA	A-92	I-02	1,5	1	1 ha/h
26/04/2011	26/04/2011	Abono	Abono	AGROMECA	A-94	A-23	1	1	1 ha/h
27/04/2011	27/04/2011	Control Químico	Control Químico	AGROMECA	A-92	H-26	7,1	1	2.1 ha/h
27/04/2011	28/04/2011	Escardillo	Escardillo	AGROMECA	A-92	E-05		1	1.3 ha/h
29/04/2011	29/04/2011	Abono	Abono	AGROMECA	A-63	A-23	1,3	1	1 ha/h
29/04/2011	29/04/2011	Abono	Abono	AGROMECA	A-50		0,7	1	1 ha/h
04/05/2011	04/05/2011	Abono	Abono	AGROMECA	A-59	A-19	1	1	1 ha/h
04/05/2011	04/05/2011	Abono	Abono	AGROMECA	A-62	A-20	1,2	1	1 ha/h
04/05/2011	04/05/2011	Abono	Abono	AGROMECA	A-63	A-25	0,8	1	1 ha/h
04/05/2011	04/05/2011	Abono	Abono	AGROMECA	A-60		1	1	1 ha/h
04/05/2011	04/05/2011	Abono	Abono	AGROMECA	A-52	A-16	0,9	1	1 ha/h
05/05/2011	05/05/2011	Conformación Surco	Conformación Surco	AGROMECA	A-58	I-01	10	1	1 ha/h

Cuadro 8.8. Maquinaria utilizada en el lote E3- San Jacinto (Parcela 2)

Fecha Inicio	Fecha Fin	Tipo de Labor	Actividad	Propietario	Maquina	Implemento	Total Horas	Pases	Rendimiento
21/02/2011	21/02/2011	Cosecha	Cosecha	Taboga	A-1	86 Autovolteos		1	67.25 ton/ha
21/02/2011	21/02/2011	Cosecha	Cosecha	Taboga	A-5			1	67.25 ton/ha
21/02/2011	21/02/2011	Cosecha	Cosecha	Taboga	A-7			1	67.25 ton/ha
23/04/2011	24/04/2011	Preparación	Afinamiento	AGROMECA	A-91	R-09	8,2	1	1.3 ha/h
23/04/2011	24/04/2011	Preparación	Arado	AGROMECA	A-75	A-36	27	2	0.7 ha/h
23/04/2011	24/04/2011	Preparación	Nivelación	AGROMECA	A-82	R-39	15,7	1	0.4 ha/h
24/04/2011	24/04/2011	Preparación	Roturado	AGROMECA	A-82	R-09	8	1	1.2 ha/h
24/04/2011	24/04/2011	Preparación	Rufiado	AGROMECA	A-82	R-37	5,4	1	1.7 ha/h
24/04/2011	24/04/2011	Preparación	Surcado	AGROMECA	A-77	S-78	5	1	1.7 ha/h
24/04/2011	24/04/2011	Preparación	Volteo de Cepa	AGROMECA	A-93	R-09	6,7	1	1 ha/h
25/04/2011	25/04/2011	Conformación Surco	Conformación Surco	AGROMECA	A-51	C-32	4,1	1	1.7 ha/h
10/05/2011	10/05/2011	Acarreo de Semilla	Acarreo de Semilla	AGROMECA	A-57	S	8	1	0.5 ha/h
10/05/2011	10/05/2011	Acarreo de Semilla	Acarreo de Semilla	AGROMECA	A-56	S	8	1	0.5 ha/h

10/05/2011	10/05/2011	Acarreo de Semilla	Acarreo de Semilla	AGROMECA	A-67	S	8	1	0.5 ha/h
10/05/2011	10/05/2011	Acarreo de Semilla	Acarreo de Semilla	AGROMECA	A-57	S	8	1	0.5 ha/h
11/05/2011	11/05/2011	Acarreo de Semilla	Acarreo de Semilla	AGROMECA	A-67	S	8	1	0.5 ha/h
11/05/2011	11/05/2011	Acarreo de Semilla	Acarreo de Semilla	AGROMECA	A-56	S	3	1	0.5 ha/h
12/05/2011	12/05/2011	Acarreo de Semilla	Acarreo de Semilla	AGROMECA	A-67	S	5	1	0.5 ha/h
14/05/2011	14/05/2011	Control Químico	Control Químico	AGROMECA	A-88	H-26	3	1	2.1 ha/h
16/05/2011	16/05/2011	Control Químico	Control Químico	AGROMECA	A-88	H-26	4	1	2.1 ha/h

Cuadro 8.9. Maquinaria utilizada en el lote J3- San Juan (Parcela 1)

Fecha Inicio	Fecha Fin	Tipo de Labor	Actividad	Propietario	Maquina	Implemento	Total Horas	Pases	Rendimiento
14/02/2011	14/02/2011	Cosecha	Cosecha	Taboga	A-4	90 Autovolteo	13,4	1	83.45 ton/ha
14/02/2011	14/02/2011	Cosecha	Cosecha	Taboga	A-6			1	83.45 ton/ha
14/02/2011	14/02/2011	Cosecha	Cosecha	Taboga	A-8			1	83.45 ton/ha
02/04/2011	02/04/2011	Preparación	Arado	AGROMECA	A-75	A-36	13,4	2	0.7 ha/h
03/04/2011	03/04/2011	Preparación	Nivelación	AGROMECA	A-93	R-39	3	1	0.2 ha/h
03/04/2011	03/04/2011	Preparación	Afinamiento	AGROMECA	A-82	R-09	2,4	1	1.3 ha/h
03/04/2011	03/04/2011	Preparación	Afinamiento	AGROMECA	A-76	R-14	5	1	1.3 ha/h
03/04/2011	03/04/2011	Preparación	Nivelación	AGROMECA	A-82	R-39	76,6	1	0.2 ha/h
03/04/2011	03/04/2011	Preparación	Roturado	AGROMECA	A-93	R-09	12,3	1	1.2 ha/h
03/04/2011	03/04/2011	Preparación	Rufiado	AGROMECA	A-75	R-37	12,2	1	1.7 ha/h
03/04/2011	03/04/2011	Preparación	Surcado	AGROMECA	A-77	S-78	5	1	1.7 ha/h
03/04/2011	03/04/2011	Preparación	Volteo de Cepa	AGROMECA	A-75	R-09	10	1	1 ha/h
06/04/2011	06/04/2011	Preparación	Surcado y Abono	AGROMECA	A-77	S-78	5	1	1.7 ha/h
10/05/2011	10/05/2011	Acarreo de Semilla	Acarreo de Semilla	AGROMECA	A-57	S	3	1	0.5 ha/h
12/05/2011	12/05/2011	Acarreo de Semilla	Acarreo de Semilla	AGROMECA	A-57	S	7	1	0.5 ha/h
12/05/2011	12/05/2011	Acarreo de Semilla	Acarreo de Semilla	AGROMECA	A-67	S	6	1	0.5 ha/h
12/05/2011	12/05/2011	Acarreo de Semilla	Acarreo de Semilla	AGROMECA	A-76	S	7	1	0.5 ha/h
13/05/2011	13/05/2011	Acarreo de Semilla	Acarreo de Semilla	AGROMECA	A-67	S	3	1	0.5 ha/h

Cuadro 8.10. Total de maquinaria utilizada en los 4 lotes

Código Tractor	Tractor	Código Implemento	Implemento
503	CASE International MX 135	E-16	Escarificador
		S-58	Subsolador
A-50	NH TM7010 135HP	A-23	Abonadora
A-51	NH TM7010 135HP	C-32	Conformador
A-52	NH TM7010 135HP	A-16	Abonadora
A-56	NH TM7010 135HP	S	Acarreo semilla
A-57	NH TM7010 135HP	S	Acarreo semilla
A-58	NH TM7010 135HP	I-01	Incorporador

A-59	NH TM7010 135HP	A-23	Abonadora
		A-19	Abonadora
A-60	NH TM7010 135HP	A-23	Abonadora
		A-25	Abonadora
A-62	NH TM7010 135HP	A-20	Abonadora
A-63	NH TM7010 135HP	A-23	Abonadora
		A-25	Abonadora
A-67	NH TM7010 135HP	T-42	Tapador
		S	Acarreo semilla
A-75	NH TG245	A-36	Arado cincel
		R-37	Rufa
		R-09	Rastra
A-76	NH TM7020 150HP	R-14	Rastra
		S	Acarreo semilla
A-77	NH TM7040 180HP	S-78	Surcador recto
		S-78	Surcador recto
A-82	NH TG210	R-09	Rastra
		R-39	Inyectora
		R-37	Rufa
A-88	NH TS6020 110HP	H-26	Equipo herbicida
A-91	NH TM7040 180HP	R-09	Rastra
A-92	NH TM7010 135HP	H-26	Equipo herbicida
		E-05	Escardillo
		I-02	Incorporador
A-93	NH TG210	R-39	Inyectora
		R-09	Rastra
A-94	NH TM7020 150HP	A-23	Abonadora
A-7	JD 3510 Cosechadora Llantas	-	-
A-8		-	-
A-1	JD 3510 Cosechadora Orugas	-	-
A-5		-	-
A-2	CAMECO 2500 Cosech. Oruga	-	-
A-3		-	-
A-4		-	-
A-6		-	-
A-9		-	-
A-10		-	-



Cuadro 8.11. Especificaciones de modelos de tractor utilizados en los 4 lotes

Tractor	Potencia (HP)	Toma fuerza	Lastreado	Capacidad tanque combustible (l)	Dist entre ejes (mm)	Neumático							
						Perfil Llanta	Dimensiones llanta		Radial Convencional	Indice de carga (Kg)	Velocidad (KPH)	Presión (Psi)	Carga Agua
							RI , R1W, R2	Delanteros					
CASE International MX 135	135	Electro-Hidráulico	450	380		R-1	14.9-28	18.4-38	Convencional	2430	40	20	50%
NH TM7010	135	Electro-Hidráulico	450	380	2740	R-1	18.4-26	20.8-38	Convencional	4332	32,19	32	50%
NH TM7020	150	Electro-Hidráulico	450	380	2740	R-1	18.4-26	20.8-38	Convencional	3425	48	35	50%
NH TM7040	180	Electro-Hidráulico	855	380	2740	R-1	18.4-26	24.5-32	Convencional	3450	32,19	24	50%
NH TG210	175	Electro-Hidráulico	640	682	3050	R-1W	18.4R46	480/80R46	Radial	4250	40	23	50%
NH TS6020	110	Hidráulico	450	160	2555	R-1W	14.9R24	18.4-34	Convencional	1950	40	23	50%
Cosechadora		-	-	568	2500	E3T	23.5R25	23.5R25	Radial	?	15	56	50%
Cosechadora		-	-	568	-	Oruga	-	-	-	?	7	-	-
Cosechadora		-	-	560	-	Oruga	-	-	-	?	7	-	-

Cuadro 8.12. Peso adicional en llantas traseras de los tractores

Tractor (kg)	Peso adicional en ambas llantas traseras (kg)
NH TM7010	390
NH TM7020	650
NH TG245	720
NH TG210	720
NH TS6020	390
NH TM7040	650

Cuadro 8.13. Especificaciones del subsolador

Subsolador S-58											
Reja				Altura Acople (cm)	Dist chasis al porta reja (cm)	Forma	Brazos			Long total (cm)	Profundidad trab (cm)
Long (cm)	Ancho (cm)	Perfil (rect, trapez, aletas)	Cant rejas				Brazo (fijo, vib, osc)	Cant Brazos	Dist entre brazos (cm)		
34	8	rect, aletas	2	115	80	curvo	fijo	2	170	150	55

Cuadro 8.14. Especificaciones de los Arado de Cincel

Arado Cincel (Escarificador)												
Implemento	Reja				Dist chasis al porta reja (cm)	Forma (cm)	Brazos				Long total (cm)	Profundidad trab (cm)
	Long (cm)	Ancho (cm)	Perfil	Cant rejas			Tipo Brazo	Cant Brazos	Dist entre brazos (cm)	Long (cm)		
A-36	35	3,5	rectangular	5	15	curvo	Fijo	5	75	35	250	45
E-16	8	5	rectangular	4	15	recto	Fijo	4	120	55	170	35

Cuadro 8.15. Especificaciones del Surcador de Pico

Surcador de Pico											
Implemento	Reja				Dist del chasis al suelo (cm)	Forma	Brazos				
	Long (cm)	Ancho (cm)	Perfil	Cant rejas			Tipo Brazo	Cant Brazos	Dist entre brazos (cm)	Long (cm)	
S-78	26	8	rectangular	7	60	Aletas	Fijo	7	150	60	



Cuadro 8.16. Especificaciones de los incorporadores

Incorporador											
Implemento	Disco					Acople	Dist chasis al porta reja (cm)	Cant Brazos	Dist entre cuerpos (cm)		Long total (cm)
	Dist entre discos (cm)	Espesor (cm)	Diametro (cm)	Concavidad	Forma (p.290)				Horizontal	Vertical	
I-01	22	1	50	5	Dentado	3 pts	85	3x4	150	70	140
I-02	18	1	50	5	Dentado	4 pts	70	2X8	155	60	130

Cuadro 8.17. Especificaciones de las rastras

Rastra											
Implemento	Disco					Dist chasis al porta reja (cm)	Cuerpos			Long total (cm)	Profundidad trab (cm)
	Dist entre discos (cm)	Espesor (cm)	Diametro (cm)	Concavidad (cm)	Forma		Cant	Dist entre cuerpos	Tipo		
R-14	26	2	65	8	Dentado	80	15	2	excéntrico	450	15
R-09	36	5	72	10	Dentado	95	9	2	excéntrico	350	15
R-13	35	5	77	10	Dentado	95	12	2	excéntrico	550	15
R-10	26	5	66	9	Dentado	80	14	2	excéntrico	350	15
R-11	35	2	74	9	Dentado	95	8	2	excéntrico	450	15
R-06	28	2	60	7	Dentado	80	14	2	excéntrico	400	15

Cuadro 8.18. Especificaciones del tapador

Tapador					
Implemento	Ancho Rodillo (cm)	Diametro Discos (cm)	Dist del chasis al Disco (cm)	Dist entre Tapadores (cm)	Long total (cm)
T-42	30	40	22	1,7	100

Cuadro 8.19. Especificaciones de la Rufa

Rufas					
Implemento	Largo Reja (cm)	Largo Brazo (cm)	Cant Brazos	Dist entre Brazos (cm)	Largo Corte (m)
R-37	25	52	8	32	4

Cuadro 8.20. Especificaciones de la Inyectora

Inyectora TANAPO R-39 (modelo TEL-12)				
Dimensiones Generales (m)			Ancho de corte (m)	
Largo	Ancho	Alto		
5,8	4,06	2,82	3,66	

Cuadro 8.21. Especificaciones de las abonadoras

Abonadoras				
Implemento	Discos			Cant Tolvas
	Diametro (cm)	Dist entre discos (cm)	Cant	
A-23	65	65	4	2
A-20	70	70	4	2
A-25	64	65	4	2

Cuadro 8.22. Especificaciones de las carretas de semilla

Carretas Semilla						
Largo (cm)	Ancho (cm)	Capacidad (Ton)	Llantas			
			Tamaño (cm)	Perfil	Tipo	Presión (PSI)
400	250	4	L= 30, b= 25		5X16 5-21	45

Cuadro 8.23. Especificaciones de las carretas de Autovolteo

Carretas Autovolteo					
Implemento	Tamaño llanta	Perfil	Capas	Tipo	Presión (lbs)
H-22	600/55-22.5	I3	12	Tubeless	40
H-9	1400-24	G2	16	Convencional	40
H-26	600/55-22.5	I3	12	Tubeless	40
H-11	600/55-22.6	I3	12	Tubeless	40

Cuadro 8.24. Peso de maquinaria especifica

Código Tractor	Tractor	Implemento	Tractor utilizado	Peso implemento (kg)	Capacidad de material (Kg)	Capacidad de tractor (Kg)	Peso implemento + Capacidad	Peso Tractor (kg)		Peso Total Tractor (kg)	Peso Tractor + implemento (kg)		Peso Total Tractor + Implemento (kg)	Peso Total Tractor + Implemento + Capacidad (Kg)
								Eje Delantero	Eje Trasero		Eje Delantero	Eje Trasero		
503	CASE International MX 135	E-16	503	550	0	380	550	2430	4340	6760	2040	5260	7310	7690
		S-58	503	710	0	380	710	2430	4340	6760	1900	5590	7510	7890
A-50	NH TM7010 135HP	C-32	A-58	490	0	1680	490	3120	4580	7720	2760	5390	8200	9880
A-51		A-16	A-58	1600	750	1680	2350	3120	4580	7720	2080	7230	9320	11750
A-52		A-19	A-58	1780	750	1680	2530	3120	4580	7720	1940	7550	9500	11930
A-56		A-20	A-62	1710	750	1680	2460	3670	4820	8570	2590	7850	10460	12890
A-57		A-23	A-58	1730	750	1680	2480	3120	4580	7720	1990	7460	9450	11880
A-58		A-25	A-62	900	750	1680	1650	3670	4820	8570	3070	6500	9570	12000
A-59		T-42	A-58	1130	0	1680	1130	3120	4580	7720	2330	6500	8850	10530
A-60		E-05	A-58	480	0	1680	480	3120	4580	7720	2750	5360	8190	9870
A-62		I-02	A-58	780	0	1680	780	3120	4580	7720	2600	5860	8500	10180

A-63		I-01	A-62	840	0	1680	840	3670	4820	8530	3160	1000	4180	5860
A-67		S-9	A-61	2280	4000	1680	6280	3610	4430	8140	3540	6860	10400	16080
A-92		H-9	A-61	6080	8000	1680	14080	3610	4430	8140	3630	11200	14820	24500
		H-11	A-61	6630	8500	1680	15130	3610	4430	8140	3610	11180	14770	24950
		H-26	A-61	6910	8500	1680	15410	3610	4430	8140	3500	11550	15040	25220
		H-22	A-61	6780	8500	1680	15280	3610	4430	8140	3480	11450	14920	25100
		H-26	A-61	640	600	1680	1240	3610	4430	8140	3260	5510	8780	11060
A-75	NH TG245	A-36	A-75	860	0	2122	860	4840	6780	12850	4260	8170	12510	14632
		R-37	DENTER	2990	0	2122	2990	4840	6780	12850	-	-	15840	17962
		R-11	A-75	3580	0	2122	3580	4840	6780	12850	4790	10410	15240	17362
A-76	NH TM7020 150HP	R-06	A-80	2710	0	1680	2710	3310	5080	8430	3260	7800	11060	12740
		S (Carreta semilla)	A-80	2270	4000	1680	6270	3310	5080	8430	3150	7520	10660	16340
A-94		A-23	A-80	1780	750	1680	2530	3310	5080	8430	2180	7970	10140	12570
A-88	NH TS6020 110HP	S (Carreta semilla)	A-86	2270	4000	940	6270	2160	3490	5670	2050	5890	7930	12870
A-77	NH TM7040 180HP	S-78	A-91	2020	0	1680	2020	4330	5170	9550	3070	8480	11570	13250
A-91		R-12	A-91	3390	0	1680	3390	4330	5170	9550	4320	8610	13080	14760
A-82	NH TG210	R-11	A93	3580	0	2122	3580	4310	6030	11520	4280	9600	13890	16012
A-93		R-39	DENTER	4699	0	2122	4699	4310	6030	11520	-	-	16219	18341
		R-37	DENTER	2990	0	2122	2990	4310	6030	11520	-	-	8530	11520
	Cosechadora 2500	A-04	-	-	-	560	-	-	-	19570	-	-	-	19570
	Cosechadora 3510	A-07	-	-	-	568	-	3240	13470	16780	-	-	-	16780
	Cosechadora 3510	oruga	-	-	-	568	-	-	-	21000	-	-	-	21000

Cuadro 8.25. Área de contacto de llantas y oruga de tractores

Tractor	Llantas Delanteras				Llantas Traseras				Área de contacto (cm <sup>2</sup> )		
	L (cm)	b (cm)	P (Psi)	Cant Llantas	L (cm)	b (cm)	P (Psi)	Cant Llantas	Delanteras	Traseras	Total
TM7010	62	43	16	2	63	47	19	2	5332	5922	11254
TM7020	63	42	12	2	73	47	17	2	5292	6862	12154
TG245	85	40	22	2	70	50	17	4	6800	14000	20800
TS6020	50	40	-	2	55	40	17	2	4000	4400	8400
TM7040	60	35	13	2	60	55	20	2	4200	6600	10800
TG210	80	40	23	2	70	46	20	4	6400	12880	19280
Case Int. MX 135	50	35	16	2	75	40	18	2	3500	6000	9500
Carreta semilla	30	25	45	2	30	25	45	2	1500	1500	3000
H-9	60	45	40	2	60	45	40	2	5400	5400	10800
H-11	55	40	40	2	55	40	40	2	4400	4400	8800
H-26	50	40	40	2	50	40	40	2	4000	4000	8000
H-22	35	25	40	2	35	25	40	2	1750	1750	3500
Cosechadora JD 3510	45	30	56	2	60	50	50	2	2700	6000	8700
Cosechadora JD 3510	340	40	-	-	-	-	-	-	13600		13600
Cosechadora 2500	330	40	-	-	-	-	-	-	13200		13200

Cuadro 8.26. Cargas de Maquinaria utilizada

Tractor	Implemento	Tractor utilizado	Peso Total Tractor + Implemento (kg) + Capacidad	Área de contacto Tractor (cm <sup>2</sup> )	Área de contacto implemento(cm <sup>2</sup> )	Área de contacto Total (cm <sup>2</sup> )	Carga (kg/cm <sup>2</sup> )	Carga (MPa*10 <sup>-1</sup> )	Carga (Kpa)
CASE International MX 135	E-16	503	7690	9500	0	9500	0,81	0,79	79,328
	S-58	503	7890	9500	0	9500	0,83	0,81	81,392
NH TM7010 135HP	C-32	A-58	9880	11254	0	11254	0,88	0,86	86,035
	A-16	A-58	11750	11254	0	11254	1,04	1,02	102,319
	A-19	A-58	11930	11254	0	11254	1,06	1,04	103,887
	A-20	A-62	12890	11254	0	11254	1,15	1,12	112,246
	A-23	A-58	11880	11254	0	11254	1,06	1,03	103,451
	A-25	A-62	12000	11254	0	11254	1,07	1,04	104,496
	T-42	A-58	10530	11254	0	11254	0,94	0,92	91,695
	E-05	A-58	9870	11254	0	11254	0,88	0,86	85,948
	I-02	A-58	10180	11254	0	11254	0,90	0,89	88,648
	I-01	A-62	5860	11254	0	11254	0,52	0,51	51,029
	S-9	A-61	16080	11254	3000	14254	1,13	1,11	110,554
	H-9	A-61	24500	11254	10800	22054	1,11	1,09	108,869
	H-11	A-61	24950	11254	8800	20054	1,24	1,22	121,926
	H-26	A-61	25220	11254	8000	19254	1,31	1,28	128,366
	H-22	A-61	25100	11254	3500	14754	1,70	1,67	166,721
	H-26	A-61	11060	11254	0	11254	0,98	0,96	96,311
NH TG245	A-36		14632	20800	0	20800	0,70	0,69	68,939
	R-37	DENTER	17962	20800	0	20800	0,86	0,85	84,629
	R-11	A-75	17362	20800	0	20800	0,83	0,82	81,802
NH TM7020 150HP	R-06	A-80	12740	12154	0	12154	1,05	1,03	102,725
	S (Carreta semilla)	A-80	16340	12154	3000	15154	1,08	1,06	105,670
	A-23	A-80	12570	12154	0	12154	1,03	1,01	101,354

NH TS6020 110HP	S (Carreta semilla)	A-86	12870	8400	3000	11400	1,13	1,11	110,637
NH TM7040 180HP	S-78	A-91	13250	10800	0	10800	1,23	1,20	120,231
	R-12	A-91	14760	10800	0	10800	1,37	1,34	133,933
NH TG210	R-11	A93	16012	19280	0	19280	0,83	0,81	81,389
	R-39	-	18341	19280	0	19280	0,95	0,93	93,227
	R-37	DENTER	11520	19280	0	19280	0,60	0,59	58,556
Cosechadora 2500	oruga	-	19570	13200	0	13200	1,48	1,45	145,292
Cosechadora 3510	A-07	-	16780	8700	0	8700	1,93	1,89	189,016
Cosechadora 3510	oruga	-	21000	13600	0	13600	1,54	1,51	151,324

Cuadro 8.27. Cargas de Maquinaria utilizada en la Parcela 4

Maquina	Implemento	Carga (KPa)
503	E-16	79,33
TM7020	A-23	101,35
TM7010	I-02	88,65
	A-23	103,45
	T-42	91,70
	H-9	108,87
	H-11	121,93
	H-26	128,37
Cosechadora	H-22	166,72
		189,02

Cuadro 8.28. Cargas de Maquinaria utilizada en la Parcela 3

Maquina	Implemento	Carga (KPa)
TM7020	A-23	101,35
CASE	S-58	81,39
TM7010	I-02	88,65
	H-26	128,37
	E-05	85,95
	A-23	103,45
	A-19	103,89
	A-20	112,25
	A-25	104,50
	A-16	102,32
	I-01	51,03
	H-9	108,87
	H-11	121,93
H-22	166,72	
Cosechadora		189,02

Cuadro 8.29. Cargas de Maquinaria utilizada en la Parcela 2

Tractor	Implemento	Carga (KPa)
TM7010	H-9	108,87
	H-11	121,93
	H-26	128,37
	H-22	166,72
	C-32	86,04
	S	110,55



	H-26	128,37
TM7040	S-78	120,23
	R-09	133,93
NH TG245	A-36	68,94
Cosechadora		189,02

Cuadro 8.30. Cargas de Maquinaria utilizada en la Parcela 1

<b>Maquina</b>	<b>Implemento</b>	<b>Carga (KPa)</b>
TG210	R-39	93,23
	R-09	81,39
TM7020	S	105,67
	R-14	102,73
TM7040	S-78	120,23
TG245	A-36	68,94
	R-37	84,63
	R-09	81,80
TM7010	S	110,55
	H-9	108,87
	H-11	121,93
	H-26	128,37
	H-22	166,72
Cosechadora		189,02

Cuadro 8.31. Datos de Resistencia a la penetración y % de humedad de la Parcela 1

Suelo	Lote	Cosechas	Momento	Calicata	Posición	Profundidad (cm)	Resistencia (N/cm2)	Humedad %
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp de cosecha	1	Entresurco	15	0	35
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp de cosecha	2	Entresurco	15	210	32
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp de cosecha	3	Entresurco	15	-	34
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp de cosecha	4	Entresurco	15	0	34
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp de cosecha	1	Surco	15	310	31
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp de cosecha	2	Surco	15	481	28
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp de cosecha	3	Surco	15	-	35
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp de cosecha	4	Surco	15	190	29
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp subsolado	1	Entresurco	15	251	11
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp subsolado	2	Entresurco	15	391	14
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp subsolado	3	Entresurco	15	181	38
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp subsolado	4	Entresurco	15	283	16
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp subsolado	1	Surco	15	360	18
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp subsolado	2	Surco	15	349	15
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp subsolado	3	Surco	15	293	12
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp subsolado	4	Surco	15	280	14
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp siembra	1	Entresurco	15	-	11
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp siembra	2	Entresurco	15	-	11
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp siembra	3	Entresurco	15	0	46
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp siembra	4	Entresurco	15	-	9
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp siembra	1	Surco	15	-	11
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp siembra	2	Surco	15	-	10
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp siembra	3	Surco	15	-	22
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp siembra	4	Surco	15	-	10

Arcilla	San Juan	Siembra	Desp de cosecha	1	Entresurco	30	0	38
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp de cosecha	2	Entresurco	30	123	33
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp de cosecha	3	Entresurco	30	-	35
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp de cosecha	4	Entresurco	30	0	33
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp de cosecha	1	Surco	30	241	31
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp de cosecha	2	Surco	30	323	29
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp de cosecha	3	Surco	30	-	31
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp de cosecha	4	Surco	30	81	35
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp subsolado	1	Entresurco	30	99	33
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp subsolado	2	Entresurco	30	259	31
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp subsolado	3	Entresurco	30	0	42
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp subsolado	4	Entresurco	30	29	39
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp subsolado	1	Surco	30	309	22
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp subsolado	2	Surco	30	374	28
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp subsolado	3	Surco	30	114	37
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp subsolado	4	Surco	30	190	33
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp siembra	1	Entresurco	30	274	28
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp siembra	2	Entresurco	30	43	37
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp siembra	3	Entresurco	30	0	41
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp siembra	4	Entresurco	30	111	34
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp siembra	1	Surco	30	237	27
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp siembra	2	Surco	30	209	26
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp siembra	3	Surco	30	0	44
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp siembra	4	Surco	30	143	31
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp de cosecha	1	Entresurco	60	0	38
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp de cosecha	2	Entresurco	60	43	37
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp de cosecha	3	Entresurco	60	-	38

Arcilla	San Juan	Siembra	Desp de cosecha	4	Entresurco	60	0	38
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp de cosecha	1	Surco	60	91	36
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp de cosecha	2	Surco	60	194	32
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp de cosecha	3	Surco	60	-	35
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp de cosecha	4	Surco	60	80	36
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp subsolado	1	Entresurco	60	74	41
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp subsolado	2	Entresurco	60	109	37
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp subsolado	3	Entresurco	60	0	40
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp subsolado	4	Entresurco	60	57	36
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp subsolado	1	Surco	60	150	39
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp subsolado	2	Surco	60	191	34
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp subsolado	3	Surco	60	57	37
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp subsolado	4	Surco	60	140	37
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp siembra	1	Entresurco	60	100	37
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp siembra	2	Entresurco	60	0	39
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp siembra	3	Entresurco	60	0	39
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp siembra	4	Entresurco	60	0	38
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp siembra	1	Surco	60	100	38
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp siembra	2	Surco	60	100	33
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp siembra	3	Surco	60	0	41
Arcilla	San Juan	Siembra	Desp siembra	4	Surco	60	0	36

Cuadro 8.32. Datos de Resistencia a la penetración y % de humedad de la Parcela 2

Suelo	Lote	Cosechas	Momento	Calicata	Posición	Profundidad (cm)	Resistencia (N/cm2)	Humedad %
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp de cosecha	1	Entresurco	15	109	37
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp de cosecha	2	Entresurco	15	246	28
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp de cosecha	3	Entresurco	15	304	32
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp de cosecha	4	Entresurco	15	363	28
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp de cosecha	1	Surco	15	314	28
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp de cosecha	2	Surco	15	320	28
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp de cosecha	3	Surco	15	241	29
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp de cosecha	4	Surco	15	360	27
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp subsolado	1	Entresurco	15	251	16
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp subsolado	2	Entresurco	15	159	15
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp subsolado	3	Entresurco	15	0	19
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp subsolado	4	Entresurco	15	29	16
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp subsolado	1	Surco	15	279	21
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp subsolado	2	Surco	15	159	15
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp subsolado	3	Surco	15	29	14

	Jacinto							
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp subsolado	4	Surco	15	193	14
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp siembra	1	Entresurco	15	71	36
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp siembra	2	Entresurco	15	46	36
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp siembra	3	Entresurco	15	29	34
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp siembra	4	Entresurco	15	194	23
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp siembra	1	Surco	15	91	29
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp siembra	2	Surco	15	111	32
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp siembra	3	Surco	15	106	30
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp siembra	4	Surco	15	46	27
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp de cosecha	1	Entresurco	30	93	37
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp de cosecha	2	Entresurco	30	324	35
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp de cosecha	3	Entresurco	30	437	34
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp de cosecha	4	Entresurco	30	134	43
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp de cosecha	1	Surco	30	316	23
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp de cosecha	2	Surco	30	230	31

	Jacinto							
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp de cosecha	3	Surco	30	360	26
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp de cosecha	4	Surco	30	207	27
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp subsolado	1	Entresurco	30	259	28
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp subsolado	2	Entresurco	30	166	32
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp subsolado	3	Entresurco	30	202	22
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp subsolado	4	Entresurco	30	109	31
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp subsolado	1	Surco	30	279	25
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp subsolado	2	Surco	30	306	29
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp subsolado	3	Surco	30	210	20
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp subsolado	4	Surco	30	150	31
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp siembra	1	Entresurco	30	91	36
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp siembra	2	Entresurco	30	103	37
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp siembra	3	Entresurco	30	106	39
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp siembra	4	Entresurco	30	254	25
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp siembra	1	Surco	30	63	38
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp siembra	2	Surco	30	43	37

	Jacinto							
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp siembra	3	Surco	30	0	33
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp siembra	4	Surco	30	229	29
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp de cosecha	1	Entresurco	60	200	42
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp de cosecha	2	Entresurco	60	71	62
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp de cosecha	3	Entresurco	60	130	59
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp de cosecha	4	Entresurco	60	87	52
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp de cosecha	1	Surco	60	310	30
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp de cosecha	2	Surco	60	320	34
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp de cosecha	3	Surco	60	120	53
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp de cosecha	4	Surco	60	71	47
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp subsolado	1	Entresurco	60	164	43
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp subsolado	2	Entresurco	60	353	17
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp subsolado	3	Entresurco	60	43	46
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp subsolado	4	Entresurco	60	153	40
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp subsolado	1	Surco	60	267	32



	Jacinto							
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp subsolado	2	Surco	60	266	24
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp subsolado	3	Surco	60	66	46
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp subsolado	4	Surco	60	150	38
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp siembra	1	Entresurco	60	-	-
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp siembra	2	Entresurco	60	254	41
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp siembra	3	Entresurco	60	134	58
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp siembra	4	Entresurco	60	14	58
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp siembra	1	Surco	60	86	43
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp siembra	2	Surco	60	169	45
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp siembra	3	Surco	60	0	51
Franco arcillo arenoso	San Jacinto	Siembra	Desp siembra	4	Surco	60	229	47

Cuadro 8.33. Datos de Resistencia a la penetración y % de humedad de la Parcela 3

Suelo	Lote	Cosechas	Momento	Calicata	Posición	Profundidad (cm)	Resistencia (N/cm2)	Humedad %
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Antes de cosecha	1	Entresurco	15	149	34
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Antes de cosecha	2	Entresurco	15	0	39
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Antes de cosecha	3	Entresurco	15	86	33
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Antes de cosecha	4	Entresurco	15	181	37
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Antes de cosecha	1	Surco	15	217	30
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Antes de cosecha	2	Surco	15	304	25
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Antes de cosecha	3	Surco	15	147	30
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Antes de cosecha	4	Surco	15	74	39
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de cosecha	1	Entresurco	15	23	34
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de cosecha	2	Entresurco	15	239	27
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de cosecha	3	Entresurco	15	334	23
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de cosecha	4	Entresurco	15	301	27
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de cosecha	1	Surco	15	324	24
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de cosecha	2	Surco	15	226	30
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de cosecha	3	Surco	15	349	22
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de cosecha	4	Surco	15	20	38
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de subsolado	1	Entresurco	15	-	-
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de subsolado	2	Entresurco	15	-	-
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de subsolado	3	Entresurco	15	-	-
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de subsolado	4	Entresurco	15	-	-
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de subsolado	1	Surco	15	380	26
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de subsolado	2	Surco	15	297	25
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de subsolado	3	Surco	15	486	15
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de subsolado	4	Surco	15	531	25
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp fertilización	1	Entresurco	15	0	39

Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp fertilización	2	Entresurco	15	0	36
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp fertilización	3	Entresurco	15	0	38
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp fertilización	4	Entresurco	15	0	35
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp fertilización	1	Surco	15	0	36
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp fertilización	2	Surco	15	140	25
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp fertilización	3	Surco	15	0	30
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp fertilización	4	Surco	15	237	41
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Antes de cosecha	1	Entresurco	30	17	36
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Antes de cosecha	2	Entresurco	30	0	38
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Antes de cosecha	3	Entresurco	30	87	32
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Antes de cosecha	4	Entresurco	30	84	37
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Antes de cosecha	1	Surco	30	156	30
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Antes de cosecha	2	Surco	30	217	28
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Antes de cosecha	3	Surco	30	137	30
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Antes de cosecha	4	Surco	30	39	36
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de cosecha	1	Entresurco	30	14	33
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de cosecha	2	Entresurco	30	97	30
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de cosecha	3	Entresurco	30	164	25
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de cosecha	4	Entresurco	30	154	33
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de cosecha	1	Surco	30	240	31
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de cosecha	2	Surco	30	219	30
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de cosecha	3	Surco	30	233	27
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de cosecha	4	Surco	30	14	37
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de subsolado	1	Entresurco	30	134	35
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de subsolado	2	Entresurco	30	189	32
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de subsolado	3	Entresurco	30	207	29

Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de subsolado	4	Entresurco	30	453	26
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de subsolado	1	Surco	30	291	25
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de subsolado	2	Surco	30	277	29
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de subsolado	3	Surco	30	253	32
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de subsolado	4	Surco	30	377	30
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp fertilización	1	Entresurco	30	0	37
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp fertilización	2	Entresurco	30	0	35
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp fertilización	3	Entresurco	30	0	37
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp fertilización	4	Entresurco	30	0	36
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp fertilización	1	Surco	30	0	35
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp fertilización	2	Surco	30	106	31
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp fertilización	3	Surco	30	0	32
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp fertilización	4	Surco	30	103	39
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Antes de cosecha	1	Entresurco	60	23	37
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Antes de cosecha	2	Entresurco	60	0	35
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Antes de cosecha	3	Entresurco	60	57	34
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Antes de cosecha	4	Entresurco	60	0	46
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Antes de cosecha	1	Surco	60	57	34
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Antes de cosecha	2	Surco	60	0	33
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Antes de cosecha	3	Surco	60	81	32
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Antes de cosecha	4	Surco	60	0	42
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de cosecha	1	Entresurco	60	0	32
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de cosecha	2	Entresurco	60	0	30
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de cosecha	3	Entresurco	60	103	28
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de cosecha	4	Entresurco	60	21	41
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de cosecha	1	Surco	60	16	28

Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de cosecha	2	Surco	60	91	30
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de cosecha	3	Surco	60	206	27
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de cosecha	4	Surco	60	97	40
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de subsolado	1	Entresurco	60	79	35
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de subsolado	2	Entresurco	60	144	32
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de subsolado	3	Entresurco	60	111	31
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de subsolado	4	Entresurco	60	177	29
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de subsolado	1	Surco	60	169	29
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de subsolado	2	Surco	60	246	28
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de subsolado	3	Surco	60	227	29
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp de subsolado	4	Surco	60	193	32
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp fertilización	1	Entresurco	60	0	29
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp fertilización	2	Entresurco	60	0	37
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp fertilización	3	Entresurco	60	106	36
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp fertilización	4	Entresurco	60	0	39
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp fertilización	1	Surco	60	0	33
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp fertilización	2	Surco	60	0	37
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp fertilización	3	Surco	60	0	35
Arcilla	Hortigal	Cosecha	Desp fertilización	4	Surco	60	0	38

Cuadro 8.34. Datos de Resistencia a la penetración y % de humedad de la Parcela 4

Suelo	Lote	Cosechas	Momento	Calicata	Posición	Profundidad (cm)	Resistencia (N/cm2)	Humedad %
Franco	Liberiano	Cosecha	Antes de cosecha	1	Entresurco	15	326	25
Franco	Liberiano	Cosecha	Antes de cosecha	2	Entresurco	15	396	27
Franco	Liberiano	Cosecha	Antes de cosecha	3	Entresurco	15	591	17
Franco	Liberiano	Cosecha	Antes de cosecha	4	Entresurco	15	317	31
Franco	Liberiano	Cosecha	Antes de cosecha	1	Surco	15	421	19
Franco	Liberiano	Cosecha	Antes de cosecha	2	Surco	15	383	21
Franco	Liberiano	Cosecha	Antes de cosecha	3	Surco	15	533	19
Franco	Liberiano	Cosecha	Antes de cosecha	4	Surco	15	411	25
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de cosecha	1	Entresurco	15	560	25
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de cosecha	2	Entresurco	15	544	27
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de cosecha	3	Entresurco	15	571	20
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de cosecha	4	Entresurco	15	574	25
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de cosecha	1	Surco	15	589	22
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de cosecha	2	Surco	15	457	21
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de cosecha	3	Surco	15	486	20
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de cosecha	4	Surco	15	517	23
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de subsolado	1	Entresurco	15	623	21
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de subsolado	2	Entresurco	15	466	26
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de subsolado	3	Entresurco	15	431	27
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de subsolado	4	Entresurco	15	306	25
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de subsolado	1	Surco	15	403	18
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de subsolado	2	Surco	15	329	24
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de subsolado	3	Surco	15	497	24
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de subsolado	4	Surco	15	340	26
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp fertilización	1	Entresurco	15	-	-

Franco	Liberiano	Cosecha	Desp fertilización	2	Entresurco	15	429	22
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp fertilización	3	Entresurco	15	0	35
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp fertilización	4	Entresurco	15	131	33
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp fertilización	1	Surco	15	-	-
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp fertilización	2	Surco	15	409	16
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp fertilización	3	Surco	15	43	32
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp fertilización	4	Surco	15	174	44
Franco	Liberiano	Cosecha	Antes de cosecha	1	Entresurco	30	239	24
Franco	Liberiano	Cosecha	Antes de cosecha	2	Entresurco	30	239	28
Franco	Liberiano	Cosecha	Antes de cosecha	3	Entresurco	30	466	12
Franco	Liberiano	Cosecha	Antes de cosecha	4	Entresurco	30	286	36
Franco	Liberiano	Cosecha	Antes de cosecha	1	Surco	30	349	21
Franco	Liberiano	Cosecha	Antes de cosecha	2	Surco	30	476	30
Franco	Liberiano	Cosecha	Antes de cosecha	3	Surco	30	499	18
Franco	Liberiano	Cosecha	Antes de cosecha	4	Surco	30	421	28
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de cosecha	1	Entresurco	30	443	18
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de cosecha	2	Entresurco	30	329	29
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de cosecha	3	Entresurco	30	509	10
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de cosecha	4	Entresurco	30	577	28
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de cosecha	1	Surco	30	594	22
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de cosecha	2	Surco	30	617	22
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de cosecha	3	Surco	30	771	18
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de cosecha	4	Surco	30	646	26
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de subsolado	1	Entresurco	30	357	26
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de subsolado	2	Entresurco	30	246	30
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de subsolado	3	Entresurco	30	369	19

Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de subsolado	4	Entresurco	30	391	27
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de subsolado	1	Surco	30	643	23
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de subsolado	2	Surco	30	446	23
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de subsolado	3	Surco	30	534	24
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de subsolado	4	Surco	30	371	29
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp fertilización	1	Entresurco	30	-	-
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp fertilización	2	Entresurco	30	311	26
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp fertilización	3	Entresurco	30	0	37
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp fertilización	4	Entresurco	30	100	42
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp fertilización	1	Surco	30	-	-
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp fertilización	2	Surco	30	420	22
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp fertilización	3	Surco	30	29	37
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp fertilización	4	Surco	30	134	33
Franco	Liberiano	Cosecha	Antes de cosecha	1	Entresurco	60	310	15
Franco	Liberiano	Cosecha	Antes de cosecha	2	Entresurco	60	119	30
Franco	Liberiano	Cosecha	Antes de cosecha	3	Entresurco	60	211	22
Franco	Liberiano	Cosecha	Antes de cosecha	4	Entresurco	60	0	29
Franco	Liberiano	Cosecha	Antes de cosecha	1	Surco	60	183	17
Franco	Liberiano	Cosecha	Antes de cosecha	2	Surco	60	333	26
Franco	Liberiano	Cosecha	Antes de cosecha	3	Surco	60	440	8
Franco	Liberiano	Cosecha	Antes de cosecha	4	Surco	60	339	26
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de cosecha	1	Entresurco	60	560	12
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de cosecha	2	Entresurco	60	206	26
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de cosecha	3	Entresurco	60	449	13
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de cosecha	4	Entresurco	60	434	26
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de cosecha	1	Surco	60	419	15



Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de cosecha	2	Surco	60	434	25
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de cosecha	3	Surco	60	426	9
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de cosecha	4	Surco	60	474	24
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de subsolado	1	Entresurco	60	117	34
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de subsolado	2	Entresurco	60	111	27
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de subsolado	3	Entresurco	60	411	14
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de subsolado	4	Entresurco	60	491	24
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de subsolado	1	Surco	60	171	29
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de subsolado	2	Surco	60	177	30
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de subsolado	3	Surco	60	534	12
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp de subsolado	4	Surco	60	480	25
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp fertilización	1	Entresurco	60	-	-
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp fertilización	2	Entresurco	60	43	34
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp fertilización	3	Entresurco	60	0	30
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp fertilización	4	Entresurco	60	0	49
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp fertilización	1	Surco	60	-	-
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp fertilización	2	Surco	60	166	29
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp fertilización	3	Surco	60	57	28
Franco	Liberiano	Cosecha	Desp fertilización	4	Surco	60	0	30



