

USO DE LABRANZA VERTICAL Y AGRICULTURA DE PRECISIÓN PARA LA OPTIMIZACIÓN DE ENERGÍA EN LABRANZA PRIMARIA DEL SUELO

MARCO ANTONIO REYNOLDS CHÁVEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para
Obtener el grado de:

Doctor en Ciencias
En Ingeniería de Sistemas de Producción



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO

Saltillo, Coahuila, México
Diciembre de 2014

USO DE LABRANZA VERTICAL Y AGRICULTURA DE PRECISIÓN PARA LA OPTIMIZACIÓN DE ENERGÍA EN LABRANZA PRIMARIA DEL SUELO

MARCO ANTONIO REYNOLDS CHÁVEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para
Obtener el grado de:

Doctor en Ciencias
En Ingeniería de Sistemas de Producción



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO

Saltillo, Coahuila, México
Diciembre de 2014

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO

**USO DE LABRANZA VERTICAL Y AGRICULTURA DE PRECISIÓN PARA LA
OPTIMIZACIÓN DE ENERGÍA EN LABRANZA PRIMARIA DEL SUELO**

MARCO ANTONIO REYNOLDS CHÁVEZ

Tesis elaborada bajo la supervisión del comité particular de asesoría y aprobada como
requisito parcial, para optar al grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

COMITÉ PARTICULAR

Asesor principal: _____
Dr. Santos Gabriel Campos Magaña

Asesor: _____
Dr. Martín Cadena Zapata

Asesor: _____
Dr. Rubén López Cervantes

Asesor: _____
Dr. Mario Cantú Sifuentes

Asesor: _____
Dr. Fernando García Navarro

Dr. Alberto Sandoval Rangel
Subdirector de Postgrado

Saltillo, Coahuila, México. Diciembre de 2014.

Agradecimientos

A DIOS-por darme la oportunidad de tener una familia maravillosa, por las bendiciones recibidas y por estar siempre de mi lado.

A LA UAAAN - hospedera de sueños e ilusiones.

AL CONACYT / INIFAP -por el apoyo y sustento para la culminación de este proyecto profesional.

AL DR. SANTOS GABRIEL CAMPOS MAGAÑA -por su apoyo incondicional, por la confianza depositada en mí, por su experiencia, conocimientos y por compartir muchos de los retos de mi vida profesional.

AL COMITÉ PARTICULAR DE ASESORÍA -Dr. Martin Cadena Zapata, Dr. Rubén López Cervantes, Dr. Pedro Andrade Sánchez, Dr. Mario Cantú Sifuentes, Dr. Fernando García Navarro, Dr. Karim del Alba por las muestras de apoyo para la culminación de este proyecto, por sus conocimientos compartidos y las aportaciones realizadas.

AL M.C. H.URIEL SERNA F. -por tu calidad de vida como persona y tus innumerables muestras de amistad.

AL DR. ALEJANDRO ZERMEÑO - por su apoyo, por compartir su conocimiento y por brindarme su amistad.

AL DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA- a las personas que de alguna u otra manera siempre me brindaron su ayuda de forma entusiasta e incondicional, a los profesores, personal técnico y en especial a Juanita Valenzuela.

UN ESPECIAL AGRADECIMIENTO AL PERSONAL DE SUBDIRECCIÓN DE POST-GRADO.Lupita. por su siempre valiosa ayuda y su amistad, ejemplo de una mujer maravillosa. Gracias también a la Dr. Rosa María Garza Q. por el apoyo brindado. Gracias a Alicia por su inconmensurable ayuda y sus muestras de amistad.

PARA MI PRIMA LUPITA SOBERANO, NICO Y TOÑITO -con quienes mantuvimos

siempre el espíritu de familia, por su apoyo, su cariño. . . .gracias.

AGRADEZCO PROFUNDAMENTE A: FRANCISCO MARTILL, LETY SALAS, NEFTALI CUERVO, JUAN LÓPEZ, RAFA LOYO, NATALIA CUERVO, LA PEQUE VALENTINA, POR DARME LA OPORTUNIDAD DE COMPARTIR SU AMISTAD Y POR LOS MARAVILLOSOS MOMENTOS QUE COMPARTIMOS JUNTOS COMO FAMILIA.

GRACIAS PARA TODOS MIS AMIGOS Y EQUIPO DE TRABAJO, A MIS TÍOS, PRIMOS, SOBRINOS, CUÑADAS Y CUÑADO POR QUE SIEMPRE HAN CREÍDO EN MÍ.

A MIS AMIGOS Y AMIGAS Y AQUELLAS MARAVILLOSAS PERSONAS QUE POR ALGUNA RAZÓN SE OMITEN PEROQUE SON PARTE DE ESTE LOGRO.

COMPENDIO

**Uso de labranza vertical y agricultura de precisión para la optimización de energía
en labranza primaria del suelo**

POR:

Marco Antonio Reynolds Chávez

DOCTORADO

Ingeniería de Sistemas de Producción

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

Saltillo, Coahuila, México. Diciembre de 2014

Dr. Santos Gabriel Campos Magaña -Asesor-

El propósito de este estudio fue la optimización del consumo de energía en la aplicación de labranza primaria del suelo. Para ello, fue necesaria la integración tecnológica del uso de labranza vertical (LV) basado en la Teoría de la Profundidad Crítica y la Agricultura de Precisión (AP). El fundamento tecnológico consistió en la incorporación de parámetros y componentes de operación que en forma individual representan un ahorro significativo de energía en la aplicación de LV en comparación con el sistema utilizado en forma tradicional, aunado a lo anterior, se adicionó el uso de la AP con el manejo heterogéneo o de sitio específico para aplicar labranza profunda variable.

En la tecnología de LV, se desarrolló un sistema para el monitoreo integral de fuerzas de

reacción del suelo y evaluar el funcionamiento en implementos de labranza. El equipo estuvo conformado por tres transductores Octagonales de Anillo Extendido (OAE) y una estructura acoplada entre el enganche del tractor y el implemento a evaluar. Los resultados en laboratorio mostraron una correlación del 99.9%, garantizando alta confiabilidad y precisión en cada sensor. Por otra parte, se realizó el diseño, construcción y evaluación de un prototipo articulado de arado de cinceles con aplicación variable de LV en forma automática, a través del uso de componentes electrohidráulicos. Una vez desarrollados y calibrados el prototipo y el sistema integral, fueron evaluados en campo 15 arreglos con los cuatro parámetros de operación más significativos en ahorro de energía en LV (profundidad de trabajo, posición y espaciamiento de cinceles, número de cuerpos y uso de alas. El mejor arreglo fue para la configuración de seis cinceles (cuatro someros a 0.20 m de profundidad y espaciados a 0.60 m) y (dos cinceles profundos con alas a 0.30 m de profundidad y espaciados a 1.20 m) en comparación con el sistema tradicional de siete cinceles. Se obtuvo un ahorro altamente significativo de 23.88% en la energía total consumida, 40% en la demanda de fuerza de tiro y 38.68% en la resistencia específica, por una reducción no significativa de área disturbada del 7.35%. En la aplicación de AP, se obtuvo el desarrollo del carro porta-sensores para la medición de parámetros físicos del suelo, incluye el Penetrometro; el cual está integrado por dos sensores: para la medición de la magnitud y profundidad de las capas duras del suelo, con lo que se generaron mapas de diagnóstico de resistencia a la penetración. Así mismo, el equipo cuenta con un controlador FMX con sistema GPS-RTK para la geo-referenciación de las variables. Ya ubicadas las capas duras en la generación de mapas de diagnóstico, se generan los mapas de prescripción y el controlador fue capaz de realizar en franjas a través de la facilidad Field Level II de nivelación, la aplicación variable en forma inteligente. Con la integración de ambos sistemas se proyecta un ahorro de energía total consumida en Mjha-1 de 26.58 y 40.73% para la aplicación de labranza diferenciada a profundidades de trabajo de 0.20 y 0.30 m, respectivamente.

Palabras clave: Tecnología de tasa variable, labranza vertical, consumo de energía, mapas de diagnóstico, controladores, agricultura de precisión.

ABSTRACT

Use of tined tillage and precision agriculture to optimize energy in primary soil tillage

By:

Marco Antonio Reynolds Chávez

DOCTOR

Production Engineering System

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

Saltillo, Coahuila, México. December 2014

PhD. Santos Gabriel Campos Magaña -Advisor-

The purpose of this study was the optimization of energy consumption in the application of primary tillage. To do this, it was necessary to use technological integration of vertical tillage (VT) based in the Critical Depth Theory and Precision Agriculture (PA). The technological rationale was the incorporation of parameters and operating components which individually represent significant energy savings in the application of VT compared to the system used in traditional form, together with the above, the use of PA was added with heterogeneous or site-specific management to apply variable-depth tillage.

In VT technology, a system for an integrated monitoring of soil reaction forces and evaluating performance in tillage implements was developed. The equipment consisted of three Transducers Extended Octagonal Ring (OER's) and a coupled frame between the hitch tractor and the implement to evaluate. The laboratory results showed a 99.9% of correlation, ensuring high reliability and accuracy at each sensor. Furthermore, the design, construction and evaluation of an articulated chisel plow prototype with variable application of VT were performed automatically through the use of electro-hydraulic components. Once developed and calibrated the prototype and the integral system, 15 arrangements with the four most significant operation parameters in energy saving in VT (working depth, position and spacing of chisels, number of bodies and use of wings) were evaluated in field conditions. The best arrangement was for six chisels configuration (four shallow to 0.20 m deep and spaced 0.60 m) and (two deep winged chisels to 0.30 m deep and spaced 1.20 m) compared to the traditional system of seven chisels. A highly significant savings of 23.88% in total energy consumption was obtained, 40% in draft force demand and 38.68% in the specific soil resistance, likewise a non-significant reduction of 7.35% of the disturbed area was obtained. In the application of PA, a development of holder carriage portable sensors for measuring physical parameters of the soil was obtained, including a penetrometer; which consists of two sensors: for measuring the magnitude and depth of hardpans of soil, with this data information a diagnostic map of penetration resistance was generated. Also, the equipment includes a FMX controller with GPS-RTK system for geo-referencing variables. Already located hardpans in diagnostic map, prescription map are generated and the drive controller was able to perform intelligent variable application in strips through the leveling facility of Field Level II program. With the integration of both systems, a savings of total energy consumed of 26.58 and 40.73% in MJha¹ for variable rate technology in tillage application of working at depths of 0.20 and 0.30 m, were projected, respectively.

Keywords: VRT, vertical tillage, energy consumption, diagnostic maps, drive controllers, precision agriculture.

Índice general

I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo General	4
1.1.1. Objetivos Específicos	4
1.2. Hipótesis	5
II. REVISIÓN DE LITERATURA	6
2.1. Labranza	6
2.1.1. Labranza primaria	7
2.1.2. Labranza secundaria	8
2.1.3. Sistemas de labranza	8
2.1.4. Labranza vertical	9
2.1.5. Uso de implementos para labranza vertical	10
2.1.6. Conceptos de labranza vertical	11
2.1.7. Ventajas de la labranza vertical	12
2.1.8. Cinceles, su modo de acción y formas	13
2.1.9. Teoría de la profundidad crítica	15
2.1.10. Parámetros de operación de cinceles	19

2.2.	Factores de diseño y evaluación para herramientas de labranza	20
2.2.1.	Fuerzas que actúan sobre una herramienta de labranza	21
2.2.2.	Relación de la fuerza vertical y horizontal	24
2.2.3.	Análisis de esfuerzos	24
2.2.4.	Transductores de Fuerza	28
2.2.5.	Parámetros para la selección del diseño de transductores	31
2.2.6.	Análisis teórico del diseño de un transductor tipo Anillo	33
2.2.7.	Sensor de anillo extendido	36
2.2.8.	Galgas extensiométricas	36
2.2.9.	Puente de Wheatstone	38
2.2.10.	Sistema de adquisición de datos	39
2.3.	Agricultura de Precisión (AP)	42
2.3.1.	Impacto con el uso de la AP	46
2.3.2.	Aplicación de la AP en el mundo	47
2.3.3.	Tendencias de la AP	50
2.4.	Variabilidad del suelo	53
2.4.1.	Clasificación de la variabilidad	54
2.4.2.	Tratamiento de la variabilidad	55
2.4.3.	Uso de herramientas estadísticas en la variabilidad	56
2.5.	Manejo de sitio específico	56
2.6.	Propiedades físico-mecánicas del suelo	57
2.6.1.	Compactación del suelo y resistencia a la penetración	58
2.6.2.	Humedad del suelo	60

2.7.	Desarrollo de sensores aplicados en la agricultura	62
2.7.1.	Sensores eléctricos y electromagnéticos	63
2.7.2.	Sensores de tratamientos en tiempo real	65
2.7.3.	Sensores mecánicos	66
2.7.4.	Sensores de proximidad para la medición de profundidad	69
2.8.	Sistema de posicionamiento global (GPS)	70
2.8.1.	Composición global (GPS)	71
2.8.2.	Correcciones diferenciales	72
2.8.3.	Señales de corrección	74
2.9.	Sistemas de información geográfica (SIG)	74
2.9.1.	Interpolación en SIG	78
2.9.2.	Mapas de rendimiento	78
2.9.3.	Mapas de diagnóstico y prescripción	81
2.10.	Uso de procesadores y controladores en la AP	83
2.10.1.	Uso del controlador FMX TRIMBLE	84
2.10.2.	Funcionabilidad	86
2.10.3.	Manejo de la información	87
2.10.4.	Sistema Ag GPS Field Level	88
2.11.	Sistemas de control en la AP	89
2.11.1.	Sistemas hidráulicos	90
2.11.2.	Actuadores	92
2.11.3.	Circuitos electrónicos	95

III. MATERIALES Y MÉTODOS	97
3.1. Fase 1 (labranza vertical)	99
3.2. Fase 2 (labranza vertical)	103
3.3. Fase 3 (agricultura de precisión)	104
3.4. Fase 4 (agricultura de precisión)	106
3.5. Fase 5 (labranza vertical)	109
3.6. Fase 6 (labranza vertical y agricultura de precisión)	110
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	111
4.1. Productos de la Fase I (Labranza Vertical)	111
4.1.1. <i>ARTICULO CIENTÍFICO I- An experimental determination of the specific soil resistance of a sandy loam soil using vertical soil tillage in the northeast of México. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin American.</i>	115
4.2. Productos de la Fase II (Labranza Vertical)	130
4.2.1. Desarrollo de un prototipo articulado de arado de cinceles para la aplicación variable de labranza primaria.	130
4.3. Productos de la Fase III (Agricultura de Precisión)	132
4.3.1. Desarrollo de un carro-portasensores para el diagnóstico de propiedades físicas del suelo	132
4.3.2. <i>ARTICULO CIENTÍFICO II- Desarrollo de un Penetrometro con Tecnología GPS-RTK para la Generación de Mapas de Diagnóstico</i> 137	
4.4. Productos de la Fase IV (Agricultura de Precisión)	159
4.4.1. Desarrollo de una metodología para la generación de mapas de prescripción en la aplicación variable de labranza primaria	159
4.4.2. <i>ARTICULO CIENTÍFICO III- Sistema inteligente para labranza vertical. Etapa I: Mapas de prescripción para la aplicación inteligente de labranza vertical.</i>	161

4.5. Productos de la Fase V (Labranza Vertical)	187
4.5.1. ARTICULO CIENTÍFICO IV- <i>Desarrollo de un Sistema Integral de Medición de fuerzas para la Evaluación de implementos de labranza.</i>	188
4.5.2. ARTICULO CIENTÍFICO V- <i>Vertical Tillage Parameters to Optimize Energy Consumption.</i>	213
4.6. Resultados de la Fase VI (Labranza Vertical + Agricultura de Precisión) .	237
4.6.1. Consumo energético en la aplicación variable de labranza primaria del suelo	237
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	241
VI. Literatura Citada	246
Anexos	260
A. Diseño del transductor	260
A.1. Cálculos realizados para el diseño del transductor	260
A.2. Pegado de galgas y cableado	261
B. Calibración del equipo y transductor	265
C. Generación de mapas de diagnóstico	277
C.1. Secuencia para realización del mapeo en el programa Arc View 3.2 para el mapa de interpolación de la resistencia a la penetración del suelo	277
C.2. Secuencia para realización del mapeo en el programa Gs+ Versión 9 para % de Humedad y conductividad eléctrica.	281
D. Planos de diseño del arado articulado	286

E. Configuración del sistema de control	293
E.1. Agregar aplicaciones a la pantalla FmX	293
E.2. Configuración de la estación base RTK	294
E.2.1. Configuración del receptor	294
E.2.2. Cambiando el nombre y la descripción de la estación base	294
E.2.3. Configuración de la referencia latitud, longitud y altura de la estación base	295
E.2.4. Medición y cambio de la altura de la antena	296
F. Edición del plano de diseño (prescripción)	297
F.1. Levantamiento topográfico	297
F.2. Conversión de coordenadas	299
F.2.1. Conversión de coordenadas GMS.d a G.d	299
F.2.2. Extracción de coordenadas del MBP	300
F.2.3. Conversión de coordenadas geográficas a UTM	301
F.3. Alturas de Prescripción	306
F.3.1. Adición de los puntos del Trazado (relativas) a la base Multiplane.txt	307
F.3.2. Procesado en el simulador de la pantalla FmX	310
F.3.3. Cargar mapa de prescripción a la pantalla FmX	312
F.3.4. Diseño de trabajo en FieldLevel II	313
F.4. Laboreo Variable en base al mapa de prescripción	315
F.4.1. Ajustes preliminares	315
F.4.2. Trabajo en campo	316

**G. Procedimiento para el cálculo de energía por el método del área bajo la curva
MATLAB**

318

Índice de figuras

2.1. Implementos en labranza vertical a) Arado de cincel rastrojero, b) Vibrocultivador con placa niveladora y desterronador, c) Cultivador de campo rastrojero.	11
2.2. Una comparación entre un muro de contención y una falla de suelo con cuchilla de corte (McKyes, 1989).	15
2.3. La diferencia en movimiento patrón de suelo entre una cuchilla ancha y una cuchilla de corte estrecha (McKyes, 1989).	16
2.4. Modelo de falla tridimensional del suelo (McKyes y Ali, 1977e).	16
2.5. Ilustración de la profundidad crítica en el corte del suelo (O'Callaghan y Farrelly, 1964).	17
2.6. El modelo de la fuerza para la falla de profundidad crítica de Godwin (1974).	18
2.7. Gráfica donde se muestra el comportamiento de la fuerza vertical en un abresurcos cuando se aplica un incremento en la velocidad, (Randolph, 1976).	25
2.8. Estado de deformación en tensión o compresión.	26
2.9. Estado de deformación-flexión.	26
2.10. Estado de deformación en torsión.	28
2.11. Diagrama de adquisición y procesamiento de datos (Mojica, 2000).	31
2.12. Fuerzas actuando en un elemento del anillo.	33
2.13. Transductores tipo anillo: (a) anillo liso extendido; (b) anillo octagonal extendido "EOR", (Chen <i>et al.</i> , 2005).	36

2.14. Galgas extensiométricas (producto comercial, www.kiowa-ei.com).	37
2.15. Puente de Wheatstone (Godwin, 1993).	39
2.16. Diagrama de bloques del sistema de instrumentación del tractor (Kheiralla y Azmi, 2002).	40
2.17. Dispositivo de adquisición de datos DAQBOOK/2000.	41
2.18. Herramientas para la agricultura de precisión, Bragachini <i>et al.</i> , (2004).	43
2.19. Mapa de variabilidad del suelo, siembra 2011 (www.wikiagro.com).	53
2.20. Sonda TDR (FieldScout, marca comercial de producto).	62
2.21. Disposición de los electrodos en equipos de muestreo de suelos(a) Modelo ERDC3100., con configuración Wenner y (b) ARP GEOCARTA. (www.veristech.com).	64
2.22. Ejemplo de un mapa de conductividad eléctrica aparente (ECa) Obtenido con un equipo EM38 (www.todoagro.com).	65
2.23. Sistema de tratamiento en tiempo real con sensor de vegetación situado al frente del tractor (cortesía de www.umwelt.fritzmeir.de).	66
2.24. Esquema ilustrativo de cuchilla plana desarrollada por Adamchuk (2001)	68
2.25. Modelo CAD del sensor de perfil de la compactación del suelo (SCP) desarrollado por (Andrade <i>et al.</i> , 2008).	69
2.26. Satélites (a) NAVSTAR (b) Constelación de los satélites del sistema GPS.	70
2.27. Corrección diferencial con un satélite geoestacionario.	73
2.28. Corrección diferencial RTK (www.trimble.com).	73
2.29. Capas de un SIG, (F.A.O., 1999)	76
2.30. Resultados después de un rastreo satelital (F.A.O., 1999).	76
2.31. Generación de capas en GIS (Catastro, cartografía y SIGS, 2009).	77
2.32. Mapa de rendimiento de maíz (Méndez et al ,2011): Proyecto Máquinas y Agro-componentes Precisos – INTA Manfredi.	81

2.33. Funciones de la pantalla FMX. (Agrolaser nivel S.L., 2014).	85
2.34. Esquema de sistema hidráulico centro abierto, (Más que máquinas, 2013).	91
2.35. Sistema hidráulico centro cerrado (www.másquemáquinas.com,2013). . .	92
2.36. Actuador hidráulico de doble efecto (www.másquemáquinas.com,2013) .	93
2.37. Válvulas proporcionales, “Conceptos básicos: Neumática e Hidráulica” (www.sapiensman.com/neumatica).	94
2.38. Control de lazo cerrado con válvulas proporcionales, “Conceptos básicos: Neumática e Hidráulica” (www.sapiensman.com/neumatica).	94
2.39. Electroválvula de doble solenoide (www.sapiensman.com).	95
4.1. a) Diseño de EOR b) construcción y acondicionamiento de EOR.	112
4.2. a) Diseño del marco integral b) calibración en laboratorio.	112
4.3. a) Calibración de EOR b) estandarizado de EOR.	113
4.4. a y b Evaluación de Sistema integral de monitoreo en campo.	113
4.5. Diseño conceptual del prototipo articulado de arado de cinceles.	130
4.6. Prototipo articulado de arado de cinceles	131
4.7. Carro-portasensores desarrollado con el penetrómetro acoplado.	133
4.8. Sensor de anillo simple.	134
4.9. Sensor de profundidad.	134
4.10. Carro portasensores y componentes del sistema de muestreo para la medi- ción de (RP) en campo.	135
4.11. Mapas de la resistencia a la penetración del suelo (MPa) a profundidades de a) 0.20, b) 0.30 y c) 0.40 m.	136
4.12. Respuesta del sistema de control a una prescripción de labranza variable. .	159
A.1. Octagonal lijado listo para montaje de galgas extensiométricas.	262

A.2. líneas de posición de las galgas extensiométricas según el puente de Wheats- tone	262
A.3. Colocación de las galgas extensiométricas en el octagonal extendido . . .	263
A.4. Proporcionando calor a los octagonales extendidos	263
A.5. Colocación de conectores galga-cable.	264
A.6. Sistema de cableado de los sensores octagonales	264

Índice de cuadros

2.1. Comparación entre sistemas de labranza para la medición de diferentes parámetros, Fuente: Cook y Lewis, 1989.	12
2.2. Determinación de fuerza de tiro en diferentes implementos integrales, (Hunt, 1983).	22
2.3. Media de las fuerzas y momento en un subsolador, (Garner, 1988).	23
2.4. Rango de fuerzas de implementos, (ASAE D230, 1997).	23
2.5. Análisis de datos para la fuerza requerida en cada implemento, Fc: Fuerza en la barra de compresión y FT: fuerza en el tiro, (Marín, 2003).	23
2.6. Etapas para la aplicación de AP (Adaptado de USDA, 1998).	45
2.7. Sensores disponibles para el análisis dinámico de suelos y atributos evaluados con cada uno de ellos, (Adamchuk et al., 2004).	63
3.1. Evaluaciones en bloques de arreglos de cincel bajo condiciones en campo.	102
3.2. Parámetros de diseño	104
4.1. Parámetros de diseño	131
4.2. Especificaciones técnicas del penetrómetro.	133
4.3. Resultados del desempeño energético de diferentes arreglos con parámetros de labranza vertical.	238
4.4. Funcionamiento energético de los arreglos de seis y siete cuerpos.	239

C.1. Cuadro de datos % de humedad y conductividad eléctrica 282

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

La demanda de alimentos, el uso de los recursos energéticos y combustibles continúan aumentando en todo el mundo. En relación a la producción de alimentos, el incremento en la densidad de la población implica un aumento en el uso de energía de combustibles fósiles y un mayor impacto ambiental (Conforti y Giampietro, 1997; Nass, 2008).

Para las labores de establecimiento de cultivos, actualmente se requiere un gran consumo de energía en forma de combustible. Es importante señalar, que los recientes logros en el rendimiento de los cultivos no son suficientes en comparación con el alto costo de energía consumida; por lo tanto, es necesario optimizar los recursos utilizados en actividades que requieren los mayores costos en la producción agrícola, tales como la labranza del suelo, considerada como la actividad agrícola que requiere la mayor cantidad de energía en la producción de alimentos en el mundo (IDAE, 2006; Adeyowin y Ajav, 2013).

En México, no se es ajeno a esta problemática, por el contrario, a nivel nacional existe una alta demanda en la producción de alimentos del 33.5 por ciento de la superficie sembrada, según registros de la balanza agroalimentaria del año 2012 y publicados por (CEFP, 2013). En el país, actualmente se destinan 10 millones de hectáreas a la producción de cultivos básicos (maíz, trigo, frijol y arroz), mismos granos en el que se presenta

una producción deficitaria (FAO, 2009). Algunos de los mayores problemas, son los altos costos de producción y el rendimiento por hectárea debidos a la labranza del suelo, ya que esta actividad se realiza de manera tradicional, con un tratamiento homogéneo (inversión total del suelo en toda la superficie de siembra y a una sola profundidad de labor), carente de diagnóstico para el adecuado manejo del suelo, con ausencia de tecnologías y conocimiento para su aplicación. Dichos factores repercuten en la cosecha de cultivos y en la poca rentabilidad de producción.

En la actualidad, se ha incrementado el interés por el uso eficiente de la energía, la conservación de los recursos del suelo y agua, principalmente donde es escasa, lo que ha traído un cambio en actitudes con respecto a las prácticas de manejo del suelo y los residuos. Por otra parte, el costo creciente de los combustibles, la reducción de los precios de los productos agrícolas y aspectos medio ambientales, son factores que pueden limitar la actividad agrícola pues reduce la relación costo-beneficio del sistema de producción (Kichler *et al.*, 2007). En consecuencia; se ha generado una progresiva reducción de las labores y una constante búsqueda de alternativas tecnológicas que sustituyan el manejo tradicional de producción. Sin embargo, se debe tener cuidado en la reducción de la intensidad de labranza, ya que en algunos cultivos, esto puede resultar en la reducción del rendimiento (Agbede, 2006). Cada año se da más énfasis al uso de las labranzas mínimas y a la preparación de la cama de siembra en la agricultura de temporal (FAO^a, 2003). Es conveniente señalar, que la labranza vertical (LV) es una alternativa tecnológica de labranza de conservación que promueve el ahorro en la demanda de energía y mejora las propiedades físicas del suelo en comparación con la labranza tradicional. La LV se refiere a un sistema donde toda la tierra está preparada con implementos que no invierten el suelo y causan poca compactación (FAO, 2000). Por lo tanto, el suelo queda normalmente con una buena cobertura de rastrojo de más de 30 por ciento sobre la superficie. Es un sistema ventajoso en un amplio rango de tipos de suelo, inclusive en los que tienen problemas de drenaje y que son susceptibles a la compactación (Agamennoni, 1996; Velázquez, 2011). La aplicación de LV se realiza con cinceles, y corresponden a la operación de estallamiento de suelo y fragmentación hasta 0.30 o 0.40 m, sin invertir los horizontes del suelo.

De acuerdo con Raper y Bergtold (2007), se puede hacer mucho para disminuir el costo de las operaciones con labranza vertical, vía reducción de uso de energía, seleccionando la adecuada geometría de los implementos, la adecuada profundidad de trabajo y humedad en el perfil del suelo. Diferentes estudios realizados muestran que en el manejo apropiado de una labor agrícola, puede conseguirse una disminución en el consumo de combustible de hasta un 30 por ciento (IDAE, 2006).

Para la correcta aplicación de LV, es necesario conocer parámetros físicos del suelo que nos permitan decidir sobre el adecuado manejo de nuestro sitio, pero en forma heterogénea, es decir, basados en la existencia de la variabilidad y conocer que, como, cuando y donde se requiere aplicar.

La tecnología de agricultura de precisión (AP) está basada en la existencia de la variabilidad en campos, la cual ha requerido de tecnología tal como un sistema de posicionamiento global (GPS), sensores, y sistemas de información geográfica (SIG) para estimar y evaluar dichas variaciones (Bongiovanni *et al.*, 2006).

La observación de la existencia de variabilidad de las propiedades o factores determinantes de la producción agrícola no es una novedad; lo que es diferente, es la posibilidad de identificar, cuantificar y mapear esa variabilidad. Más aun, es posible geo-referenciar y aplicar los insumos con dosis variable por medio de pulsos o señales eléctricas utilizando sistemas automatizados de control en puntos o áreas de coordenadas geográficas conocidas.

Después de realizar un análisis de la información documentada, es importante manifestar que no existe a nivel mundial en forma comercial la aplicación diferenciada o variable de labranza del suelo mediante el uso de agricultura de precisión. El propósito de la presente investigación fue contribuir a la optimización del consumo de energía mediante la aplicación variable de labranza primaria del suelo a través del desarrollo e implementación de una tecnología utilizando los parámetros de labranza vertical y el uso de agricultura de precisión.

1.1 Objetivo General

Optimizar el consumo de energía en labranza primaria del suelo a través de la aplicación variable de tecnología de labranza vertical basada en la teoría de la profundidad crítica y agricultura de precisión.

1.1.1. Objetivos Específicos

1. Determinar el o los arreglos de parámetros de cinceles que presenten el menor valor de la resistencia específica del suelo (Nm^{-2}) en la aplicación de labranza primaria basada en la teoría de la profundidad crítica.
2. Diseñar, construir y evaluar un prototipo articulado de arado de cinceles que permita la aplicación variable de labranza primaria del suelo.
3. Desarrollar un carro porta-sensores para la medición geo-referenciada de parámetros físicos del suelo en tiempo real y que dicha información permita a través de un SIG la generación de mapas de diagnóstico.
4. Elaborar una metodología para la implementación de un sistema automatizado de control para la aplicación variable de labranza vertical profunda a través de la generación de mapas de prescripción y su conectividad con el controlador FMX.
5. Evaluar el sistema integral bajo condiciones en campo de los arreglos que presentaron los menores requerimientos de resistencia específica del suelo en tres diferentes profundidades de trabajo (0.20, 0.30 y 0.40 m) y compararlos con la referencia del sistema tradicional.
6. Determinar el consumo de energía por unidad de superficie (MJha^{-1}) en la aplicación vertical variable de labranza primaria.
7. Aplicar en forma integral el uso de la tecnología variable de labranza vertical.

1.2 Hipótesis

- El uso de la tecnología de labranza vertical basada en la teoría de la profundidad crítica asociada con la tecnología de agricultura de precisión, reducirá hasta en un 15% el consumo total de energía aplicado en los sistemas convencionales de labranza vertical en la preparación primaria del suelo.
- A través del desarrollo e implementación de una tecnología automatizada de labranza, con el uso de mapas de prescripción de sitio específico basados en mapas de diagnóstico y con equipos de control, es posible realizar la aplicación variable de labranza primaria del suelo optimizando el consumo de energía.

Capítulo II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Labranza

Durante miles de años de historia, la humanidad ha labrado la tierra con el fin de aumentar la producción de alimentos. La labranza del suelo, en general, es una de las operaciones de campo fundamentales en la agricultura, debido a su influencia en las propiedades del suelo, medio ambiente y la producción de cultivos. Para asegurar el crecimiento normal de la planta, el suelo debe estar preparado en tales condiciones que las raíces pueden tener suficiente aire, el agua y los nutrientes. (Gill y McCreery, 1960; Gill y Vandenberg, 1967; Mckyes, 1985a; Boydas y Turgut, 2007).

La labranza es la manipulación mecánica del suelo, para la producción de cultivos en la agricultura (ASAE standarts, 2002). Sin embargo, existen efectos directos e indirectos que se logran con la labranza, entre los cuales se encuentran: facilitar la producción de los cultivos, el control de malezas, acondicionar la superficie del suelo para permitir una buena irrigación y una cosecha más fácil, además de facilitar la incorporación de materia orgánica, fertilizantes, pesticidas, entre otros (Hoogmoed, 1999a).

El hombre incorpora la labranza cuando intenta controlar la vegetación natural, con el fin de poder desarrollar especies de su interés. Los principales objetivos de la labranza son el control de malezas, preparación de la cama de siembra y el acondicionamiento de

las propiedades físicas del suelo (FAO^a, 2003).

La labranza es un proceso dinámico que causa profundos cambios en las propiedades físicas de los suelos, las cuales persisten por tiempo variable, dependiendo del suelo y del clima y pueden afectar fuertemente a los cultivos. Para describir estos cambios, pueden utilizarse propiedades dinámicas que reflejan la reacción del suelo a la aplicación de fuerzas como la resistencia a la penetración y densidad aparente. (Venialgo *et al.*, 2002).

2.1.1. Labranza primaria

La labranza primaria, es la labranza tradicional que se extiende a toda la capa arable, es decir, al horizonte A. Esta sirve para eliminar compactaciones superficiales, abrir el suelo y crear una estructura grumosa para acumular agua y muchas veces también incorporar, a través de la arada, plagas, malezas y semillas de malezas. La profundidad de la labranza primaria depende de la fuerza de tracción disponible. Con tracción animal es normalmente entre 10 y 20 cm, con el tractor especialmente con el aumento de potencia de los tractores modernos, se llega en algunos países hasta 40 cm. Existe una amplia polémica sobre la profundidad de la labranza primaria. En general no se debería aumentar la profundidad de labranza sólo porque se dispone de la potencia necesaria. En suelos con una capa de suelo delgada, esto puede literalmente destruir el suelo, lo que ocurre frecuentemente cuando se usan tractores. El incremento de cosecha que coincide a veces con una profundización de la capa arable, sólo en pocos casos es sostenible. Esto depende mucho de la fertilidad y la profundidad del suelo. Por otro lado, con una buena estructura del suelo las raíces de las plantas llegarán a las partes más profundas sin necesidad de una labranza profunda. A largo plazo, la labranza profunda consume más combustible mientras que los beneficios no están asegurados. (Friedrich, 1997a).

2.1.2. Labranza secundaria

La labranza secundaria sirve para preparar el suelo para la siembra. Esto incluye la formación de la superficie, la nivelación, la formación de camellones o surcos para irrigación y para establecer la cama de siembra. La cama de semilla debería extenderse solamente sobre un horizonte muy delgado hasta la profundidad prevista de la siembra. Normalmente la labranza secundaria nivela y pulveriza el suelo y una profundización de la misma solamente llevaría a una pérdida innecesaria de humedad. Cuando el suelo está todavía suelto hay que incluir también una re-compactación en la labranza secundaria. La creación de una cama de siembra tradicional surge a consecuencia de la insuficiencia de la técnica para sembrar en un terreno virgen. Hoy en día esta tecnología está suficientemente avanzada para permitir la siembra de la mayoría de los cultivos sin ninguna labranza. Además se debe considerar que la labranza secundaria deja, en un clima tropical, una superficie pulverizada en condiciones críticas con gran peligro de erosión. (Friedrich, 1997b).

2.1.3. Sistemas de labranza

Dentro de los sistemas de labranza están aquellos que hacen una remoción completa del suelo y en ocasiones una fragmentación excesiva de las partículas y no consideran la compactación del suelo, y que se conoce comúnmente como labranza tradicional. Por otro lado existe también el sistema de labranza de conservación, que se define como cualquier secuencia de labranzas que reduce las pérdidas de suelo y agua, en comparación con las de labranza convencional (Allen y Fenster, 1986; Lal, 1995).

Steiner (1998) menciona que para muchos agricultores, antes de una conciencia conservacionista, la principal razón de adopción de los sistemas de labranza de conservación es la posibilidad de reducción de costos. Vivero (1998), señala que la escasa y fluctuante producción agrícola frente a un consumo creciente de alimentos obliga al productor

agrícola a incrementar su producción con cultivos intensivos cada vez más mecanizados, con implementos inadecuados y en momentos inoportunos.

Para disminuir tales impactos y para un ahorro adecuado de energía se implementa la labranza vertical, que es parte de la labranza de conservación y ésta se puede realizar con implementos tales como los arados de cinceles, la cultivadora de campo, el vibro cultivador y el Multi-arado. El sistema de labranza a seleccionar debe además de incrementar los rendimientos del cultivo, reducir los riesgos de producción, facilitar la conservación de suelos y agua, mejorar el desarrollo del sistema radicular, mantener niveles adecuados de materia orgánica, y controlar o revertir procesos de degradación. Para ello es fundamental conocer los efectos de cada sistema de labranza, los cuales dependerán de factores climáticos, de suelos, y de cultivos. Un adecuado conocimiento de los suelos, clima y sistemas de cultivo utilizados por el agricultor, es indispensable para el desarrollo y selección de sistemas de labranza para cada situación (Boone, 1988).

2.1.4. Labranza vertical

La labranza vertical se refiere a un sistema donde toda la tierra está preparada con implementos que no invierten el suelo y causan poca compactación (FAO, 2000). Por lo tanto, el suelo queda normalmente con una buena cobertura de rastrojo de más de 30% sobre la superficie, es un sistema ventajoso en un amplio rango de tipos de suelo, inclusive en los que tienen problemas de drenaje y que son susceptibles a la compactación (Agamennoni, 1996; Velázquez, 2011). La eficacia operativa del sistema de labranza vertical es más alta que la de labranza convencional, sobre todo debido a que el vibro-cultivador trabaja con mayor velocidad y tiene mayor ancho de trabajo que la rastra de discos. Por consiguiente es posible preparar entre 50 hasta 80% más de superficie por día con labranza vertical, si se la compara con labranza convencional (Barber *et al.*, 1993a).

La principal característica de la labranza vertical es que utiliza brazos o flejes equipados con puntas en lugar de discos para aflojar el suelo sin invertirlo, dejando en la

superficie una cobertura protectora formada por los residuos del cultivo anterior y por las malezas arrancadas (Barber *et al.*, 1993b). En los Estados Unidos durante los años 1950 el arado convencional (vertedera y discos) empezó a ser reemplazado por el arado a cincel, (Phillips y Young, 1973).

2.1.5. Uso de implementos para labranza vertical

Los implementos para labranza primaria son principalmente de tres tipos básicos: arados de vertedera, de puntas estrechas e implementos de disco (Arvidsson *et al.*, 2004). Los implementos de labranza vertical de puntas estrechas demandan una menor cantidad de energía que los sistemas de labranza convencional (Hoogmoed, 1999b; Camacho Tamayo, 2007a). De acuerdo con Raper y Bergtold (2007), se puede hacer mucho para disminuir el costo de operaciones con labranza vertical vía reducción de uso de energía, seleccionando la adecuada geometría de los implementos, la adecuada profundidad de trabajo y humedad en el perfil del suelo. Entre los factores que inciden para que una herramienta de labranza requiera una menor o mayor fuerza de arrastre están, la humedad en el suelo al momento de la labor, el ángulo de inclinación entre la punta de la herramienta y el plano horizontal del suelo, el filo de la punta, el tipo de suelo, la profundidad y la velocidad de trabajo, así como la geometría de las partes y aditamentos del implemento y la configuración cuando se trata de una combinación de herramientas como en la siembra directa (Godwin y O'Dogherty *et al.*, 2007).

Para cinceles y subsoladores es importante considerar el ángulo de ataque, ya que para un valor cercano 0,436 rad se presentan bajos valores de fuerza de tracción Aluko y Seig, (2000), así como la menor resistencia específica Magalhães y Souza, (1990). Por otra parte, McKyes (1985) describe que para cinceles existe una profundidad de trabajo crítica, en la cual no existe remoción lateral de suelo, y que ésta depende del ancho del implemento y de su ángulo de ataque, así como de la densidad y contenido de humedad del suelo. Para trabajar en profundidades mayores a la crítica, es recomendable el uso de aletas laterales en la punta del cincel, lo cual reduce también la resistencia específica y

favorece el ancho de trabajo y la eficiencia de campo (McKyes, 1985).

2.1.6. Conceptos de labranza vertical

Al evaluar algunas propiedades físicas del suelo, luego de la introducción de la labranza vertical en un suelo bajo siembra directa Elizondo *et al.*, (2001) mencionan que la introducción de éste tipo de labranza en un suelo tratado con siembra directa, no produce deterioro de las condiciones físicas del suelo. También mencionan que en la labranza vertical no existen altos valores de resistencia mecánica o resistencia a la penetración de implementos comparándola con altos valores en la siembra directa.

La principal característica de la labranza vertical es que utiliza brazos o flejes equipados con puntas en lugar de discos para aflojar el suelo sin invertirlo, dejando en la superficie una cobertura protectora formada por los residuos del cultivo anterior y por las malezas arrancadas. Los implementos principales en la labranza vertical son el arado cincel rastrojero, el vibro-cultivador y el cultivador de campo rastrojero (Figura 2.1). Se debe notar que la terminología empleada para los implementos ilustrados sigue la usada por los fabricantes o aquella más comúnmente usadas. Las ilustraciones sirven para clarificar las definiciones empleadas (Barber *et al.*, 1993c).



Figura 2.1: Implementos en labranza vertical a) Arado de cincel rastrojero, b) Vibro-cultivador con placa niveladora y desterronador, c) Cultivador de campo rastrojero.

2.1.7. Ventajas de la labranza vertical

La labranza vertical sostiene mejor la productividad de los suelos debido a la presencia de los rastrojos en la superficie que protegen el suelo contra los procesos de erosión. Esta cobertura de rastrojos también impide la formación de costras superficiales (planchado) que pueden provocar una baja emergencia de los cultivos. Los implementos de labranza vertical causan poca compactación, es decir no forman una capa dura en el subsuelo (piso de arado) que limita la profundización de las raíces. En cambio los discos de labranza convencional ocasionan capas duras. Debido a que la labranza vertical no invierte el suelo, hay menos descomposición de la materia orgánica y menos pérdida de humedad, que es muy importante para la siembra (Barber, 1997d). (Ver Cuadro 2.1). Un ejemplo de los efectos de la labranza vertical sobre el contenido de humedad en el suelo, la cobertura de rastrojo y el rendimiento de maíz en comparación con otros sistemas de labranza.

Cuadro 2.1: Comparación entre sistemas de labranza para la medición de diferentes parámetros, Fuente: Cook y Lewis, 1989.

Sistema de labranza	Humedad (%)	Cobertura de rastrojos (%)	Rendimiento de Maíz (Tonha ⁻¹)
Labranza cero	13	90	5,77
Labranza vertical	12	36	5,58
Arado de cincel-disco	9	14	4,70
Labranza convencional	6	3	3,57

La FAO^b en el (2003) menciona que una de las grandes ventajas en este sistema de labranza vertical, es que el suelo queda normalmente con una buena cobertura de rastrojo de más del 30% sobre la superficie. La eficacia operativa del sistema de labranza vertical es más alta que la de labranza convencional, sobre todo debido a que el vibro-cultivador trabaja con mayor velocidad y tiene mayor ancho de trabajo que la rastra de discos. Por consiguiente, es posible preparar entre 50% hasta 80% más de superficie por día con labranza vertical, si se compara con labranza convencional. (Barber *et al.*, 1993e). Es importante destacar que este tipo de labranza es un sistema ventajoso en un amplio rango de tipos de suelo, inclusive en los que tienen problemas de drenaje y que son susceptibles a la compactación. Oussible *et al.* (1992), mencionan que el incremento en la compactación

podría restringir el abastecimiento de agua, aire, y la disponibilidad de nutrientes.

En la implementación de estos arados es importante tener en cuenta la humedad del suelo, que es un factor que incide directamente en la fuerza de tracción y requerimiento de potencia en la preparación de este. Los suelos secos presentan agregados con alta cohesión, siendo más alta en suelos arcillosos, requiriendo mayor fuerza de tracción para ser disturbados. La cohesión disminuye a medida que el contenido de agua incrementa, aumentando entonces la adhesión de las partículas del suelo sobre la superficie de la herramienta y afectando la fuerza de tracción. (Mouazen y Ramón, 2002).

2.1.8. Cinceles, su modo de acción y formas

Los cinceles, por su modo de acción, son la herramienta de labranza que más se parece al arado de madera. Al introducir el cincel en el suelo causa la compresión de éste. La labranza vertical aplicada con cincel requiere una menor cantidad de energía en comparación con el tipo de disco utilizado en los sistemas de labranza convencional (Camacho y Rodríguez, 2007b), por lo anterior es importante conocer los diferentes parámetros operativos de aperos de labranza y su efecto en el suelo (Camacho y Rodríguez, 2007c).

Cada punta tiene una profundidad útil de trabajo, por debajo de esta profundidad también llamada la profundidad crítica (PC), la compactación se puede producir en lugar de aflojar el suelo y un considerable aumento de los valores de la resistencia específica puede ocurrir (Spoor y Godwin, 1978). Esta profundidad depende de las condiciones de la geometría de la punta y de las condiciones del suelo. Mckyes (1985) describe que existe una profundidad crítica para el funcionamiento del cincel, en la que se produce la remoción lateral del suelo, y que esto depende de la anchura del implemento y su ángulo de ataque, así como el contenido de humedad y densidad del suelo. Por lo tanto, la profundidad del cincel depende del cultivo a establecer, las características del suelo y también de la fuente de energía disponible (Pandey, 2004). Además de esto, el consumo de combustible aumenta proporcionalmente con la profundidad de arado (Moitzi *et al.*, 2006; Kalk y

hulsbergen, 1999). El efecto del ángulo de inclinación o ángulo de ataque, evaluada en el trabajo (Payne y Tanner, 1959) y (Spoor y Godwin, 1978), muestran claramente cómo aumenta la fuerza horizontal y vertical con el aumento del ángulo de inclinación. El ángulo de inclinación para los cinceles, medida en la punta del cincel respecto a la horizontal fue de 25°, lo cual representa la resistencia específica más baja (Siemens *et al.*, 1965), (Wildman *et al.*, 1978) (Magalhaes y Souza, 1990), (Mathur y Pandey, 1992) y (Chaudhuri, 2001). Un aumento de la disturbación del suelo, con una resistencia específica más baja se puede lograr con la adición de alas o barredores para las puntas o cinceles profundos.

También mediante el uso de puntas poco profundas o someras de trabajo por delante de las puntas de profundidad se puede reducir significativamente la demanda de energía. Las puntas poco profundas (someras) reducen significativamente la fuerza sobre las puntas profundas, lo que indica que aflojar la superficie del suelo por una operación separada antes de aflojamiento profunda ofrece una manera eficaz de reducir la fuerza de tiro sobre la punta profunda. Esto podría ser particularmente útil en circunstancias en que el esfuerzo de tracción disponible es un factor limitante. La adición de puntas someras en la posición adecuada antes de una punta profunda puede reducir la demanda total de energía en aproximadamente un 10%. Comparaciones de valores de fuerza de tiro total muestran que la demanda de cinceles alados fue sólo ligeramente mayor que el de puntas convencionales o sin alas para un aumento de 3 veces en la disturbación total del suelo y, por tanto, una reducción muy significativa de la resistencia específica (Spoor y Godwin, 1978).

Por su forma los cinceles se clasifican en cinceles rígidos y flexibles y a su vez se clasifican según (Friedrich, 1997c).

Cinceles rígidos: 1. Los subsoladores son cinceles grandes y fuertes que pueden llegar hasta profundidades mayores de 1 m. Su uso por la alta fuerza de tracción necesaria se limita al tiro con tractores. Se distingue la forma tradicional (vertical), la forma parabólica y el "Paraplow". Para mejorar la roturación y emparejar el perfil del horizonte de trabajo de cinceles verticales o parabólicos se pueden usar rejas de alas abiertas.

2. Arados de cincel, existen tanto para tracción animal con un máximo de tres cinceles o

para tractores. Son usados para roturar y - en el caso del tractor - mezclar la capa arable. Según el tipo de suelo y el efecto deseado pueden ser equipados con una variedad de puntas. Sin embargo para esta labor normalmente se usan puntas angostas.

3. Cultivadores con cinceles rígidos, son usados para la labranza secundaria y el deshierbe, para tracción animal con hasta cinco cinceles y para tractor. Las rejas en este caso son más anchas como pata de ganso o alas abiertas con anchos de hasta más de 1 m para el control superficial de malezas en zonas áridas.

Cinceles vibratorios; Estos cinceles son tanto para tracción animal como para uso con tractor. Las formas más pesadas se usan para mezclar el suelo, las más livianas para la labranza secundaria, la preparación de la cama de siembra y el deshierbe.

2.1.9. Teoría de la profundidad crítica

Los modelos de corte del suelo, ya sea en dos o tres dimensiones, han asumido que el suelo se mueve hacia arriba en todo el rango de profundidad de la herramienta de corte, por ejemplo las figuras, (2.2), (2.3) y (2.4). Se ha observado que este no siempre es el caso, especialmente en donde un implemento de corte angosto está operando a profundidades en un suelo plástico. Kostritsyn (1956) reportó observaciones de este fenómeno el cual ha sido llamado “la profundidad crítica”, y sugiere a partir de su experiencia, que esta profundidad es generalmente de siete a ocho veces el ancho de la herramienta.

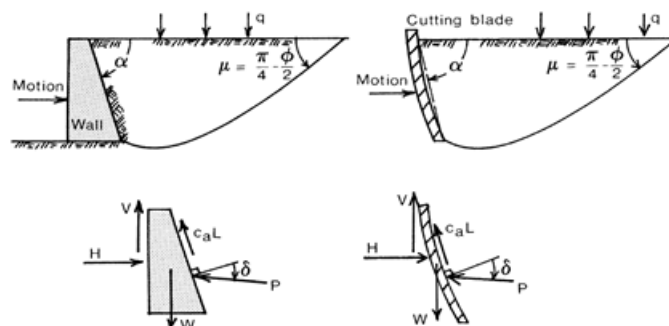


Figura 2.2: Una comparación entre un muro de contención y una falla de suelo con cuchilla de corte (McKyes, 1989).

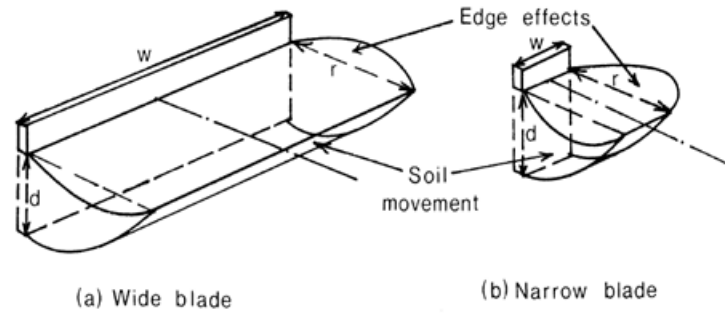


Figura 2.3: La diferencia en movimiento patrón de suelo entre una cuchilla ancha y una cuchilla de corte estrecha (McKyes, 1989).

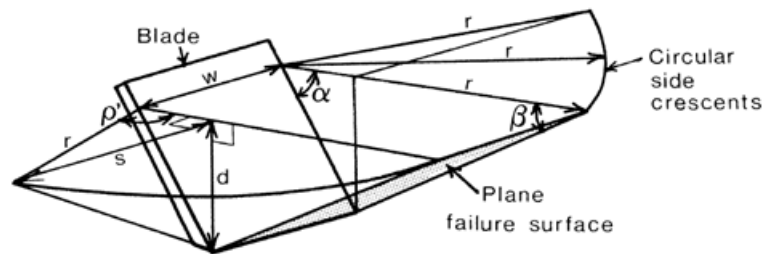


Figura 2.4: Modelo de falla tridimensional del suelo (McKyes y Ali, 1977e).

$$r = r \sin \rho' = \sqrt{d \cot^2 \beta + 2 \cot \alpha \cot \beta} \quad (2.1)$$

La figura (2.5) ilustra esquemáticamente lo que ocurre en el suelo cuando una profundidad crítica está presente. La profundidad crítica \$d_c\$ (siglas en inglés) se puede definir aproximadamente como un punto debajo del cual el suelo es desplazado por una herramienta principalmente a lo largo de líneas horizontales. Por encima de la profundidad crítica, el suelo se mueve horizontalmente y hacia arriba como en los modelos anteriores. Informes del valor de la profundidad crítica han variado considerablemente dependiendo del tipo de suelo en cuestión.

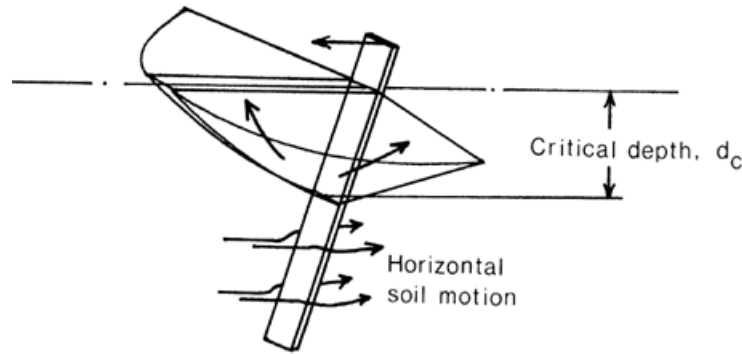


Figura 2.5: Ilustración de la profundidad crítica en el corte del suelo (O'Callaghan y Farrelly, 1964).

O'Callaghan y Farrelly (1964) observaron profundidades críticas del mismo orden de las magnitudes, así como, del ancho, cuando evaluaron cuchillas verticales de acero en suelos plásticos arenosos y arcillosos. Usando herramientas similares, sin embargo, Miller (1971) encontró profundidades críticas hasta 14 veces la dimensión del ancho de la cuchilla en arena dura, y Godwin (1974) observó la profundidad crítica en rangos de ancho de cuchilla con una variación de 10 a 16, dependiendo del ángulo de inclinación de la cuchilla en un suelo franco arenoso friable.

Godwin (1974), también postuló un modelo con el cual el régimen de fuerzas en el suelo puede ser analizado cuando una profundidad crítica está presente. Como se representa en la figura (2.6) el suelo es movido a los lados de la herramienta en mayores profundidades que el crítico, a lo largo de trayectorias espirales logarítmicas, similar al modelo de falla profunda postulado por Meyerhof (1951). La efectividad final de las espirales a lo largo de la cual se mueve el suelo se localiza en ángulo (teta) por detrás de la cara de la cuchilla. En la parte posterior de la herramienta, una presión horizontal se supone que actúan sobre el suelo, y se calcula como “en reposo” presión de tierra (fórmula). La fórmula Meyerhof (1951) se utiliza entonces para calcular la presión horizontal, q' , que actúa sobre la cara de la herramienta por debajo de la profundidad crítica ecuaciones (2.2), (2.3) y (2.4).

$$q' = cN'_c + p_0N'_q = cN'_c + \gamma zK_oN'_q \quad (2.2)$$

$$N'_q = \left[\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right] e^{2(\pi/2 + \varphi) \tan \varphi} \quad (2.3)$$

$$N'_c = \cot \varphi \left[\left[\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right] e^{2(\pi/2 + \varphi) \tan \varphi} - 1 \right] \quad (2.4)$$

La integración de esta fuerza horizontal de la profundidad crítica hasta la parte inferior de la cuchilla se obtiene la fuerza total Q ecuación (2.5) que actúa sobre esta parte de la herramienta.

$$[Q = [cN'_c(d - d_c) + \frac{\gamma}{2}K_oN'_q(d^2 - d_c^2)]]w \quad (2.5)$$

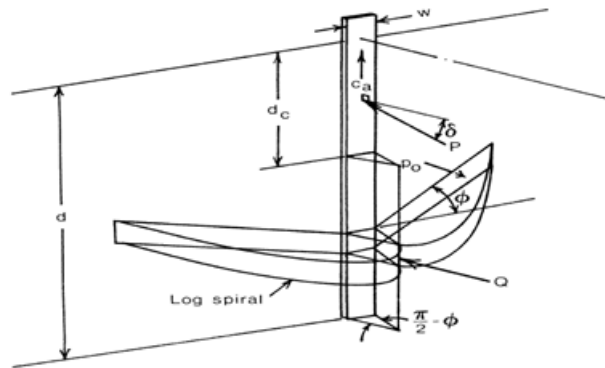


Figura 2.6: El modelo de la fuerza para la falla de profundidad crítica de Godwin (1974).

Para la fuerza P en la parte de la cuchilla por encima de la profundidad crítica, se utiliza el modelo tridimensional, ecuación (2.1). Esto es la fuerza total horizontal requerida para mover el implemento, es la suma de Q por debajo de la profundidad crítica y H1 por encima de ella, como se muestra a continuación.

$$[H = Q + H_1 = Q + P \sin(\alpha + \delta) + C_a d_c w \cot \alpha \quad (2.6)$$

Además, Godwin (1974) observó que la localización de la profundidad crítica podría ser predicha teóricamente usando el modelo anterior. Si los valores de prueba de la profundidad crítica se eligen, las fuerzas y que actúan por encima y por debajo de esta profundidad pueden hallarse. Combinando en términos como en la ecuación (2.6) nos da la fuerza total, estimando la fuerza de tiro de la herramienta. Siguiendo el principio de falla de suelo en la trayectoria de menor resistencia, es lógico que la profundidad crítica sea la que resulta en el menor requerimiento de fuerza en la herramienta. Por lo tanto, el ensayo donde la profundidad crítica da la menor fuerza total, es igual.

2.1.10. Parámetros de operación de cinceles

Es común escuchar que reduciendo el espaciamiento horizontal entre cuerpos el cincel realiza un mejor trabajo pero esta práctica en general es resistida por el productor ya que al disminuir el ancho de labor del implemento se ve reducida la capacidad de trabajo del equipo de labranza. Se piensa que al reducir la distancia entre cuerpos, la interacción producida entre ellos arrojaría como resultado una menor superficie individual a trabajar, lo que se reflejaría en una menor potencia global demandada por la herramienta (Marrón, 1998). Esto se ha verificado en escarificadores de cuerpos rígidos siempre y cuando el ángulo de ataque se mantenga constante y se trabaje a velocidades de alrededor de $1,5 \text{ kmh}^{-1}$ (Godwin *et al.*, 1984). A velocidades normales de trabajo de campo (aproximadamente 7 kmh^{-1}) la relación encontrada ha sido inversa (Riethmuller y Jarvis, 1986).

El espaciamiento entre cuerpos produjo efectos sobre el esfuerzo de tiro demandado por el arado de cinceles para los distintos tipos de cuerpos empleados. Al disminuir el espaciamiento entre cinceles desde 0.35 m hasta 0.20 m aumentó el esfuerzo de tiro. La diferencia fue del orden del 12% mayor. La potencia demandada por el arado de cinceles fue afectada por el tipo de cuerpos, para los distintos espaciamientos empleados. En general,

a medida que disminuye el espaciado entre cuerpos aumenta la resistencia específica del implemento (Marrón, 1998). Bowen (1981) expuso que para una gran cantidad de implementos con cuerpos fijos, púas flexibles, cinceles y subsoladores; los grados de desmenuzamiento en función del espacio entre cuerpos, profundidad de trabajo, tipo y ancho del diente y las condiciones del suelo. Este autor concluyó que el espacio entre cuerpos no debe ser mayor de 1,5 veces la profundidad y el fragmentado del suelo se puede lograr cuando el contenido de humedad es adecuado.

Esto corrobora los resultados obtenidos en este estudio. Ripoll (1975) utilizó nueve métodos variando las posiciones y número de cuerpos de un arado de cincel, desde dos cuerpos hasta nueve cuerpos rígidos estándar. Un modelo con cinco cuerpos en V invertida, el cual recomendó para roturación y cincelado normal; un modelo con siete cuerpos lo recomendó para alzado de rastrojos. El uso adecuado del arado de cincel es función de la distancia entre cuerpos y el ordenamiento de los cuerpos en el bastidor.

El arado de cincel produce aplicabilidad en todas las áreas de comparación. Mediante el empleo del arado de cincel, con adecuada calibración en el conjunto tractor-implemento y la posición y distancia entre los cuerpos, se podría obtener un control agronómicamente satisfactorio de malezas sin enterrarla, dejándola como material de cobertura (Hossne, 2007).

2.2 Factores de diseño y evaluación para herramientas de labranza

Las fuerzas aplicadas a una herramienta de labranza para producir un efecto dado en el suelo pueden ser medidas con exactitud, pero no se puede predecir con confiabilidad los efectos de los cambios en el diseño de la herramienta. Consecuentemente, no debe ser una sorpresa saber que el diseño de los equipos de labranza es más un arte que una ciencia (Ashburner y Sims, 1984; Gill y VandenBerg, 1967; Triplett y Van Doren, 1977).

Normalmente entre los factores que deberían ser considerados para diseñar y evaluar

un sistema de implementos de labranza enganchados en la parte posterior de un tractor son (Kepner *et al.* 1978):

1. Habilidad para obtener penetración del implemento bajo condiciones adversas, particularmente con implementos tales como rastras de discos y arado de discos
2. Efecto del implemento sobre la habilidad tractiva del tractor (transferencia de peso)
3. Uniformidad de la profundidad de laboreo, que el implemento pase sobre partes irregulares de la superficie del suelo
4. Estandarización del enganche que permita el fácil acoplamiento
5. Rapidez con la cual las herramientas entran a la tierra

Kepner *et al.* (1978) menciona que el objetivo de una herramienta de labranza es manipular un suelo (cambiar, mover o formar) que requiere cambiar una condición de éste. Tres factores resumidos de diseño son necesarios:

- a) Condición inicial del suelo
- b) Forma de la herramienta y la manera del movimiento de la herramienta y
- c) Controlar o definir la manipulación del suelo

Los resultados de estos tres factores independientes de entrada son evidenciados por dos factores de salida, a saber, la condición final del suelo y las fuerzas requeridas para manipular el suelo.

2.2.1. Fuerzas que actúan sobre una herramienta de labranza

Un implemento de labranza o herramienta moviéndose a una velocidad constante está sujeto a tres fuerzas principales o sistemas de fuerzas que deben estar en equilibrio, Kepner *et al.* (1978), las cuales son:

1. Las fuerzas de gravedad actuando sobre el implemento
2. Las fuerzas del suelo actuando sobre el implemento
3. Las fuerzas actuando entre el implemento y el primer movimiento

Clyde (1936) citado por Bonifaz (2012) subdivide el total de las fuerzas de reacción del suelo dentro de las fuerzas útiles y parásitas. El define que las fuerzas del suelo útiles, son aquellas en las cuales la herramienta debe vencer el corte, quebramiento y movimiento del suelo. Las fuerzas parásitas son aquellas (incluyendo la fricción o resistencia al rodamiento) que actúan sobre superficies estables. Cuando una herramienta no es simétrica sobre el plano vertical, longitudinal o a través de una línea centro, las fuerzas del suelo útiles frecuentemente introducen un efecto rotacional. Los requerimiento de potencia, de tiro y de energía de varias máquinas de campo (Hunt, 1983) se enlistan en el cuadro (2.2).

Cuadro 2.2: Determinación de fuerza de tiro en diferentes implementos integrales, (Hunt, 1983).

Implemento	Especificación	FH (kN)	Energía o Trabajo kW h/Ha
Arado	3 Discos	12.649	22.1 – 46.1
Arado	4 Discos	16.865	22.1 – 46.1
Rastra	20 Discos	5.928	4.0 – 7.4
Multiarado	2 Cuerpos	73	3.1 – 5.2
Sembradora	2 Hileras	3.6	2.4 - 12

Para un implemento particular y condición de suelo las fuerzas del suelo se incrementarán con la profundidad de trabajo. La resultante del peso del implemento y las fuerzas del suelo, por lo tanto, tendrán magnitud variable, dirección y posición dependiendo de la profundidad de trabajo. Dentro de las investigaciones realizadas por Garner *et al.* (1988) y citado por Bonifaz (2012), con pruebas realizadas con un dinamómetro integrado al tractor tirando de un arado de cinceles, determinaron magnitudes de las fuerzas y momentos a 0.30 y 0.43 m. de profundidad mostradas en el cuadro (2.3).

La norma ASAE D230 (1997) reporta la fuerza de tiro funcional para los diferentes implementos de labranza. En el cuadro (2.4) se muestran los valores extremos para la determinación de la fuerza de tiro en diferentes implementos:

Cuadro 2.3: Media de las fuerzas y momento en un subsolador, (Garner, 1988).

Parámetros	Profundidad 0.30	Profundidad 0.43 m
Fuerza de tiro kN	14.3	27.675
Fuerza vertical kN	-3.175	-9.125
Momento kN.m	7.805	16
Fuerza en el enganche superior kN	15.125	23.37

Cuadro 2.4: Rango de fuerzas de implementos, (ASAE D230, 1997).

Implemento	Rango de la fuerza de tiro	Variables
Arado de vertederas	$7+0.049s^2$ a $2+0.013s^2$ (N/cm ²)	S = Velocidad (Km/h)
Arado de discos	$5.2+0.039s^2$ a $2.4+0.045s^2$ (N/cm ²)	S = Velocidad (Km/h)
Rastra de discos	14.7M a 7.8M (N)	M = Masa (peso Kg)
Subsuelo	120 – 190d a 175 – 280d (N)	d = Profundidad
Sembradora	1100 a 800/fila N/fila	–

Marín (2003) e Hinojosa (2003) en una serie de evaluaciones con diferentes implementos de labranza, midieron las fuerzas de tiro en la barra de compresión, producidas por la interacción suelo-implemento (Cuadro 2.5).

Cuadro 2.5: Análisis de datos para la fuerza requerida en cada implemento, Fc: Fuerza en la barra de compresión y FT: fuerza en el tiro, (Marín, 2003).

Implementos	Fuerza en la barra de compresión			Fuerza en el tiro		
	Profundidad (m)	Fuerza media (kN)	Fuerza pico (kN)	Fuerza media (kN)	Fuerza pico (kN)	Radio entre Fc/FT
Arado	0.30	23.21	33.71	15.48	30.66	1.5
Multiarado (1 timón)	0.34	30.83	34.07	22.06	32.05	1.4
Multiarado (2 timones)	0.21	38.52	43.64	23.77	3.05	1.62
Rastra		17.05	16.24	5.39	21.92	3.16
Cultivadora		4.84	9.16	4.76	20.72	1.02
Vibrocultivador		16.46	6.73	9.84	37.78	1.67

2.2.2. Relación de la fuerza vertical y horizontal

En un arado de vertederas generalmente se tiene una componente vertical actuando hacia abajo de la fuerza útil del suelo (succión). La magnitud de la fuerza específica (V) en relación a la velocidad de avance del tractor (L) varía extensamente, empezando por la influencia del tipo de suelo, condición del suelo, profundidad de corte, partes de la forma del corte o afilados y otros factores. El valor de la fuerza vertical V se incrementa con la velocidad como se muestra en la figura (2.7), pero con una tendencia en algunos suelos para una reducción ligera de la relación V/L . La relación V/L de las pruebas realizadas en un ataque de suelos esquematizadas se obtiene rangos de relación de 0.5 a 0.6 para las arenas y de 0.35 a 0.45 para limos arenosos finos. Resultados reportados por pruebas de campo de varios tipos y condiciones de suelos, presumiblemente con partes en condiciones buenas, dan rangos de relaciones V/L de 0.1 a 0.3.

2.2.3. Análisis de esfuerzos

Una medida de fuerza con alto grado de exactitud, es de gran importancia en el análisis mecánico en un problema de ingeniería. En particular, la resistencia medida del suelo para varios funcionamientos de maquinaria, tal como el arado, es indispensable en la maquinaria agrícola para nuestro campo (Sakurai, 1996). Una medida general de la fuerza, en uno de los tres estados dimensionales es aplicada, lo que permite medir no solo una magnitud y una dirección de fuerza, sino también una posición en la línea de acción. En este caso, tres tipos de medición para la magnitud de la fuerza son considerados, los cuales primeramente son:

a) Tensión o compresión

El simple estado de tensión y compresión ocurre en el eje cuando la línea de acción coincide con el eje para la medición, se muestra en la figura (2.8).

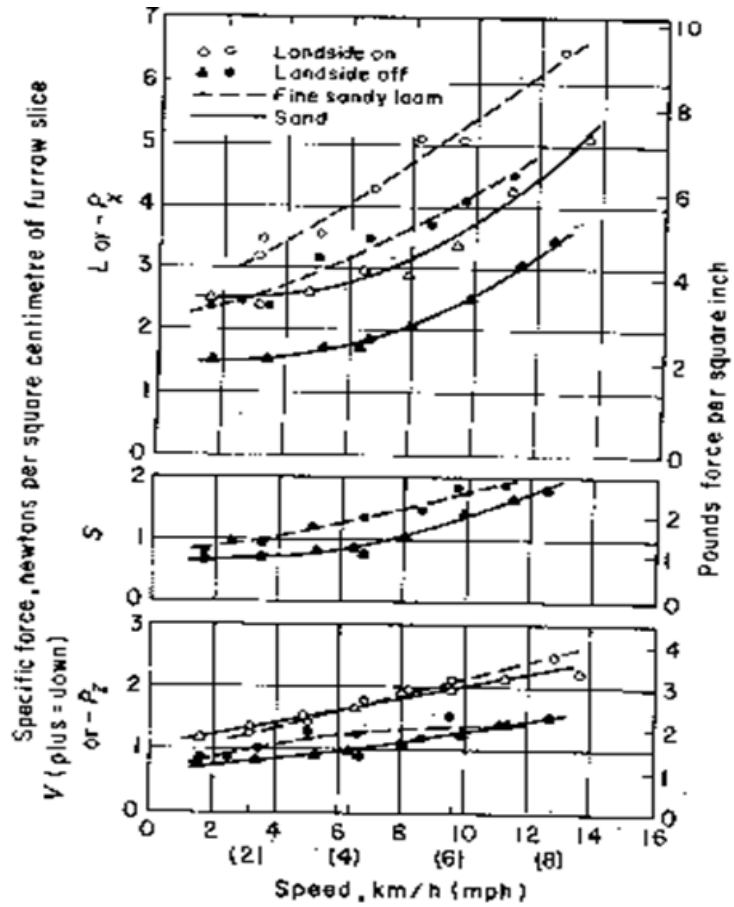


Figura 2.7: Gráfica donde se muestra el comportamiento de la fuerza vertical en un abresurcos cuando se aplica un incremento en la velocidad, (Randolph, 1976).

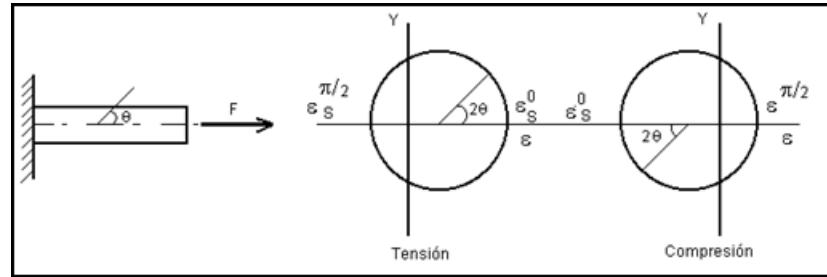


Figura 2.8: Estado de deformación en tensión o compresión.

Las deformaciones máximas principales están dada por:

$$\epsilon_s^0 = \frac{\sigma_s^0}{E} = \frac{F}{EA} \quad (2.7)$$

$$\epsilon_s^{\frac{n}{2}} = -\mu \epsilon_s^0 \quad (2.8)$$

El exponente y el subíndice son agregados a los esfuerzos y deformaciones para indicar las direcciones de ellos y condiciones de fuerza actuando respectivamente.

b) Flexión

Un estado de flexión ocurre en el eje cuando la línea de acción es perpendicular al eje y es interceptada en el centro como se muestra en figura (2.9).

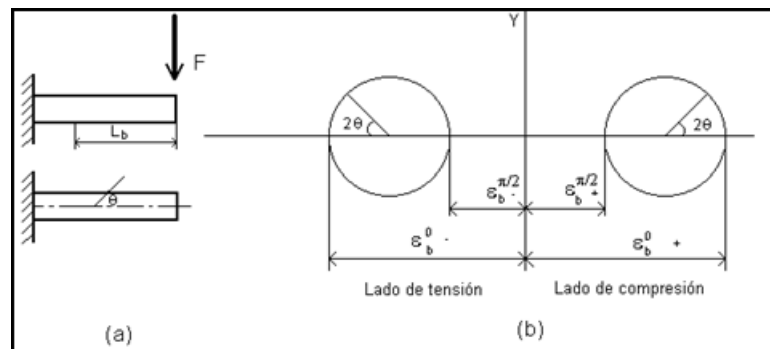


Figura 2.9: Estado de deformación-flexión.

El máximo y mínimo de deformaciones en posición aparte de la línea de acción con la distancia L_b son dados por:

$$\varepsilon_b^{0\pm} = \pm \frac{\sigma_0}{E} = \pm \frac{M}{EZ_b} = \pm \frac{FL_b}{EZ_b} \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_b^{\frac{\pi}{2}\pm} = \mu \varepsilon_b^{0\pm} = \pm \mu \frac{M}{EZ_b} = \pm \mu \frac{FL_b}{EZ_b} \quad (2.10)$$

Por lo tanto, $M = FL_b$ es un momento aplicado y Z_b es un módulo de la sección dado por:

$$Z_b = \frac{2I}{d'} \quad (2.11)$$

c) Torsión

Un estado de torsión ocurre en el eje, cuando la línea de acción no intercepta al eje y el producto escalar de vectores va en dirección de la línea del eje cero, es lo ilustrado en la figura (2.10a).

Las deformaciones principales máximas y mínimas están dadas por:

$$\varepsilon_t^{\frac{\pi}{4}}, \sigma_t^{\frac{\pi}{4}} = \frac{\tau_t}{G} = \frac{T_t}{GZ_p} = \frac{FL_t}{GZ_p} \quad (2.12)$$

$$\varepsilon_t^{\frac{\pi}{4}} = -\sigma_t^{\frac{\pi}{4}} = \frac{\tau_t}{G} = \frac{T_t}{GZ_p} = \frac{FL_t}{GZ_p} \quad (2.13)$$

Más allá referenciado a la figura (2.10b), una deformación para un ángulo q arbitrario se representa por:

$$\varepsilon_t = \frac{FL_t}{GZ_p} \sin 2\theta \quad (2.14)$$

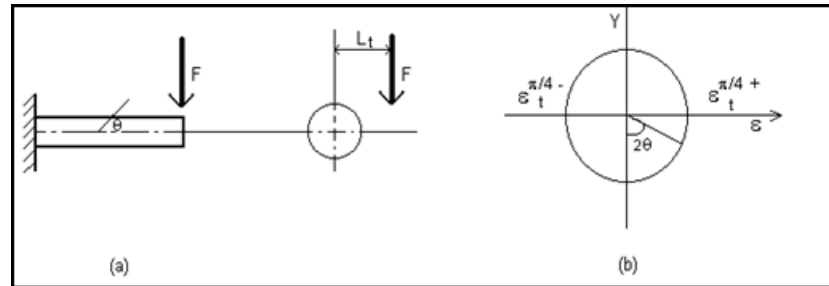


Figura 2.10: Estado de deformación en torsión.

2.2.4. Transductores de Fuerza

Los sensores o transductores de fuerza son ampliamente usados en el campo de la industria y las investigaciones, presentando muchas configuraciones en equipos comerciales. Básicamente están compuestos por: una pieza monolítica conocida como elemento elástico y por extensiómetros eléctricos o galgas extensiométricas que permiten medir, en el área de colocación de los mismos, los niveles de deformación preferiblemente uniformes, que experimenta el transductor bajo la acción de una fuerza aplicada. Estos son diseñados, para que a fuerzas relativamente bajas permitan altos niveles de deformación, siendo precisamente el elemento elástico el componente más crítico del transductor (Martínez, 2008).

La idea de emplear anillos octagonales extendidos (EOR siglas en inglés) en un sistema de medición fue introducido por primera vez por Lowen *et al.* (1951). Hoag and Yoerger (1975) derivaron ecuaciones analíticas de distribución de fuerzas para transductores simples y octagonales de anillos extendidos para diferentes cargas y condiciones límites utilizando el método de tensión de energía. Se determinaron dos ecuaciones para el momento de flexión en la sección del anillo prolongado, mismas que se utilizan para el cálculo del momento en la sección utilizando el (EOR). McLaughlin (1996) detectó algunos errores en las ecuaciones de los Hoag y Yoerger y las corrigió. Godwin (1975)

diseñó un transductor octagonal de anillo extendido para medir las fuerzas de reacción del suelo utilizando herramientas en dos direcciones, así como el momento en el plano de estas fuerzas. El reportó una buena linealidad, bajas sensibilidad cruzada y la histéresis para el transductor. También encontró que las sensibilidades prácticas de las galgas extensiométricas fueron mucho mayores que los valores obtenidos a partir de ecuaciones analíticas.

O'Dogherty (1975) diseñó un transductor para determinar las fuerzas de corte y verticales usando una cuchilla en remolacha azucarera utilizando el anillo octogonal extendida. Informó de una buena linealidad, histéresis baja en ciclos de carga y descarga, y sensibilidades cruzadas entre 4,1 y 6,5% para las fuerzas de corte y vertical, respectivamente en el proceso de calibración del transductor. Godwin *et al.* (1987) diseñó tres transductores de (EOR) usando tres diferentes materiales con diferentes relaciones de radio y diferentes espesores del anillo (r / t).

Ellos encontraron que los sistemas desarrollados de instrumentación tenían suficiente resolución para medir el comportamiento dinámico vertical de suelo a acoplado a un enganche de pivote único. Godwin *et al.* (1993) diseñó un dinamómetro utilizando dos (EOR's) para medir las fuerzas y momentos ejercidos en herramientas de labranza. Utilizaron dos (EOR's) en configuración espalda con espalda, donde los ejes longitudinales formaban ángulos de 90 °. Ellos reportaron una excelente linealidad entre las fuerzas y momentos aplicados, y la salida de voltaje en el puente, una pequeña cantidad de efecto de histéresis entre carga y descarga de las curvas de calibración, así como, una sensibilidad cruzada menor del 4%. O'Dogherty (1996) derivó una fórmula para determinar el espesor del anillo del transductor (EOR) mientras utilizaba datos de los transductores diseñados previamente por los investigadores. El introdujo un procedimiento gráfico para el diseño (EOR) basado en parámetros geométricos del anillo.

McLaughlin *et al.* (1998) diseñó y fabricó un octagonal de doble anillo extendido (DEOR por sus siglas en inglés) acoplado a una barra de tiro. Ellos calibraron el transductor utilizando métodos de carga uniaxiales y triaxiales. Los autores derivaron la regresión

de un modelo para predecir las fuerzas de tiro, verticales, y las cargas laterales, e informó de la sensibilidad cruzada del sensor de 1,9 y 7,0% para las fuerzas de tiro y verticales respectivamente.

Kheiralla *et al.* (2003) desarrollaron un dinamómetro de tres puntos de enganche automático utilizando un transductor (EOR). Ellos reportaron una sensibilidad primaria horizontal y vertical de $25,19 \text{ kN } \mu \text{ strain}^{-1}$ y $25,60 \text{ kN } \mu \text{ strain}^{-1}$ para el sensor (77.75 % y 89.77 % de las sensibilidades teóricas calculadas).

Korkut (2003) desarrolló un dinamómetro para medir las componentes de fuerza durante el corte de un metal en tres direcciones y se encontró que el dinamómetro puede utilizarse de manera fiable para la medición de fuerzas de corte. Khan *et al.* (2007) diseñó un sistema de transductor biaxial (EOR) para medir las fuerzas tractor-implemento, mostraron que la sensibilidad cruzada del sensor fue menor a 1,5 % para la mayoría de los casos. Se puede decir que la mayoría de los sistemas de medición se pueden dividir en tres partes (Campos *et al.*, 2000).

1. **Etapa detectora-transductora**, detecta la variable física y efectúa una transformación, ya sea mecánica o eléctrica para convertir la señal de una forma más manejable. Generalizando el concepto, un transductor es un dispositivo que transforma el efecto físico en otro, en gran mayoría de los casos, la variable física se transforma en una señal eléctrica, ya que ésta es la forma de señal más fácilmente medible.

2. **Etapa Intermedia**, modifica la señal que proviene del transductor, ya sea por amplificación, filtrado u otros medios para tener una salida deseable.
3. **Etapa final o terminal**, indica, graba o controla la variable que se desea medir. La figura 2.11 representa los componentes de los sistemas de medición descritos.

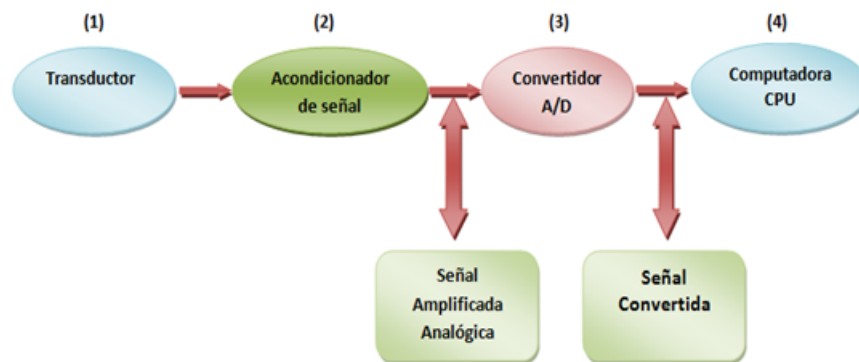


Figura 2.11: Diagrama de adquisición y procesamiento de datos (Mojica, 2000).

Mojica (2000) describe que un transductor es un dispositivo que ha sido diseñado para reaccionar ante un estímulo físico y proporcionar una salida que puede ser un desplazamiento o por lo regular un voltaje, que posteriormente puede ser comparado o analizado dependiendo de los requerimientos del sistema donde se utiliza.

Moo (1999) señala que los transductores (sensores) son elementos de transformación de una variable física correspondiente a un fenómeno, a una señal eléctrica que describe ese comportamiento y su desempeño se debe a los elementos de captura, estos solo trabajan con señales eléctricas. Generalmente los transductores son empleados en la medición de magnitudes físicas, como por ejemplo, temperatura, presión, longitud, etc.

2.2.5. Parámetros para la selección del diseño de transductores

La necesidad de conocer con precisión la magnitud y dirección de las fuerzas de reacción del suelo, que actúan sobre un implemento en particular para su diseño óptimo,

requiere el uso de transductores para medir dichos parámetros, los cuales se han diseñado para medir las fuerzas de tiro, fuerzas vertical para herramientas de geometría simétrica, ya que de acuerdo a la teoría de la falla de suelo son los componentes de interés. También existe una tercera fuerza de interés para elementos de geometría no simétrica como es la fuerza lateral. Uno de los transductores más apropiados para determinar las fuerzas de reacción del suelo en los implementos de labranza es el transductor octagonal extendido, que tienen las ventajas sobre otros comúnmente empleados en la evaluación de equipos de labranza (Campos, 1993).

- a) Sensitividad alta y predecible sin desviaciones grandes.
- b) La sensitividad cruzada insignificante.
- c) No detecta fuerzas parásitas originadas por la fricción.
- d) Tamaño relativamente pequeño.
- e) Respuesta lineal.
- f) Precisa determinación de la magnitud de las fuerzas no importando la localización de las mismas.
- g) Detecta las fuerzas en un plano, además del momento resultante con un solo transductor.
- h) Detecta los cambios de dirección de las fuerzas.

Cuando un elemento de maquinaria se somete a una fuerza, este sufre una deformación proporcional a la fuerza aplicada. La deformación puede ser causada por una carga axial, por una torsión o por un momento. Esta deformación puede ser medida para conocer la fuerza que está actuando sobre el elemento, esta fuerza es sensada mediante galgas extensiométricas. Las galgas extensiométricas pueden ser utilizadas para transformar esta

deformación en valores de voltaje, estas son adheridas al material en el cual se desea conocer la fuerza aplicada, al deformarse el material, la galga aumentaría o disminuiría su longitud junto con el material, variando así su resistencia (Mojica, 2000).

Por lo tanto, para los transductores de fuerza, se necesitan elemento elástico que transmita la fuerza en deformación. El material para construir los transductores de fuerza debe tener las siguientes características: rigidez elevada, carga de ruptura elevada, límite elástico y módulo de elasticidad bajo. Y para la elección de las galgas de deformación se consideran los siguientes factores: longitud de carga, factor y salida de galga, temperatura característica, deslizamiento característico, endurecimiento y bajo costo (Moo, 1999).

2.2.6. Análisis teórico del diseño de un transductor tipo Anillo

Un análisis teórico de la aplicación del anillo extendido del transductor octagonal fue desarrollado por Cook and Rabinowicz (1963), esto es basado en el análisis de la energía elástica de un anillo usado como una celda de carga. En la figura (2.12) se muestra las fuerzas actuando en un elemento del anillo; donde el momento flexionante (M) a cualquier punto en el anillo es calculado y es dado por la ecuación (2.15).

$$M\theta = \frac{1}{2}F_x r \left(\sin\theta - \frac{2}{\pi}\right) - \frac{1}{2}F_y r \cos\theta \quad (2.15)$$

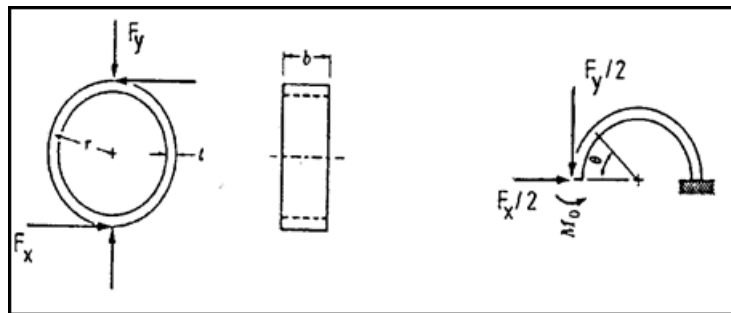


Figura 2.12: Fuerzas actuando en un elemento del anillo.

La colocación del nodo para cada fuerza individual involucrada en el elemento del anillo se encuentra cuando el momento producido por se vuelve cero y esto es verdadero cuando , ($\theta= 39.6$). El momento debido a es cero cuando $\cos=0$, ($\theta= 90$). Como resultado de este análisis, las dos colocaciones de nodo de deformación son: ($\theta= 39.6$ °) para la fuerza (Fx) y ($\theta = 90^\circ$) para la fuerza (Fy). La deformación esperada (ϵ), producida por el momento en el anillo de carga se obtuvo y está dado por las ecuaciones (2.16) y (2.17) siguientes:

$$\epsilon_{39.6^\circ} = \frac{2.31F_y r}{E b t^2} \quad (2.16)$$

$$\epsilon_{90^\circ} = \frac{1.09F_x r}{E b t^2} \quad (2.17)$$

Godwin *et al.* (1993), diseñaron un dinamómetro para medir las fuerzas y momentos que actúan sobre implementos de labranza. El diseño fue basado en dos anillos octagonales extendidos montados “espalda con espalda” o “espaldas no discretas” arreglados con sus ejes longitudinales en ángulos correctos, estos anillos se encontraban montados en un plato cada uno con la finalidad de ser colocado ante el tándem del implemento y así poder ser transportados, también se encontraban montados sobre un tubo con el propósito de medir las fuerzas que ocasiona un par o una fuerza lateral a un implemento. Mediante su investigación encontraron la posición óptima para el montaje de las galgas extensiométricas y fue de 22.5° considerando que es una modificación apropiada para la teoría de un anillo delgado. Las sensibilidades experimentales determinadas son dadas por las ecuaciones (2.18) y (2.19) siguientes:

$$\varepsilon_{22.5^\circ} = \frac{2.66F_{yr}}{Ebt^2} \quad (2.18)$$

$$\varepsilon_{90^\circ} = \frac{1.13F_{xr}}{Ebt^2} \quad (2.19)$$

Campos *et al.* (1992) desarrollaron una metodología sencilla para el diseño de Anillos Octagonales teniendo en mente su aplicación en la evaluación de implementos de labranza bajo condiciones de campo. Demostró que existe un efecto de la longitud del plato sobre la localización de los nodos de deformación, cabe señalar que Godwin *et al.* (1993) no menciona el efecto de la longitud de los platos (en función del largo total del anillo extendido) sobre la sensibilidad del transductor y su efecto sobre la localización de los nodos de deformación.

Esto se derivó en realizar una determinación experimental de las dimensiones apropiadas del plato, así como su efecto en la nueva localización de los nodos de deformación para la fuerza horizontal (F_x), corrigiendo así la localización del nodo de deformación producido por la componente horizontal localizándose a $= 39 \frac{1}{4}$ y se encontró que las sensibilidades para cada nodo de deformación dada en las ecuaciones (2.20) y (2.21) siguientes:

$$\varepsilon_{39.25^\circ} = \frac{2.24F_{yr}}{Ebt^2} \quad (2.20)$$

$$\varepsilon_{90^\circ} = \frac{2.12F_{xr}}{Ebt^2} \quad (2.21)$$

2.2.7. Sensor de anillo extendido

Los transductores octagonales de anillo extendidos han sido desarrollados como los que se muestran en la Figura (2.13); tanto el anillo extendido y anillo octagonal extendido deben tener una sección central donde los accesorios de carga pueden ser atornillados. Las galgas extensiométricas están montadas en las secciones más delgadas de anillo para la medición de fuerza. (Hoag y Yoerger, 1975).

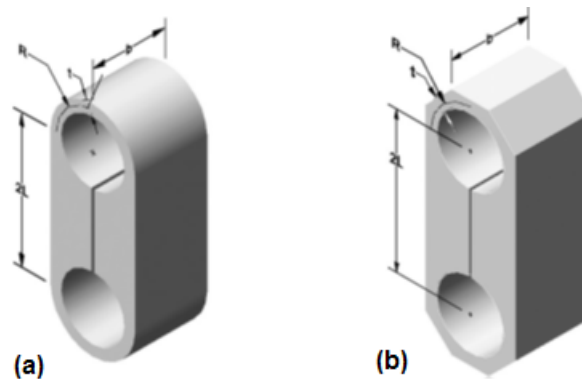


Figura 2.13: Transductores tipo anillo: (a) anillo liso extendido; (b) anillo octagonal extendido “EOR”, (Chen *et al.*, 2005).

La idea de emplear anillos octagonales extendidos (EOR’s siglas en inglés) en un sistema de medición fue introducido por primera vez por (Lowen *et al.*, 1951). Hoag and Yoerger (1975) derivaron ecuaciones analíticas de distribución de fuerzas para transductores simples y octagonales de anillos extendidos para diferentes cargas y condiciones límites utilizando el método de tensión de energía.

2.2.8. Galgas extensiométricas

Las galgas extensiométricas son un ejemplo de transductor pasivo que convierte un desplazamiento mecánico en un cambio de resistencia. Es un dispositivo delgado, con una oblea, que se puede unir (soldar) a una variedad de materiales con el fin de medir los esfuerzos aplicados. Las galgas extensiométricas metálicas se fabrican con alambres

resistentes de diámetros muy pequeños o grabado en laminillas metálicas delgadas (Figura 2.14). La resistencia del alambre o de la lámina delgada cambia de longitud a medida que el material al cual esta soldada sufre tensiones o compresiones. Este cambio de resistencia es proporcional a la tensión aplicada y se mide con un puente de Wheatstone adaptado especialmente (Cooper y Helfrick, 1991).

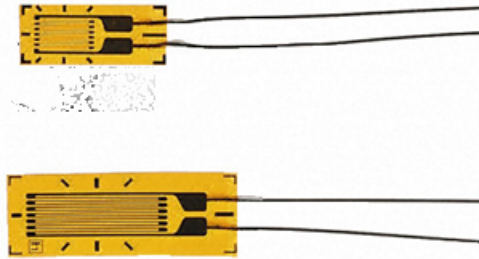


Figura 2.14: Galgas extensiométricas (producto comercial, www.kiowa-ei.com).

La sensibilidad de galgas de deformación es moderada en términos de “factor de las galgas”. La fórmula para el factor de la galga se explica como sigue: la Ley de Hook para los materiales como metales generalmente se expresa como:

$$\varepsilon = \frac{dL}{L} = \frac{\sigma}{E} \quad (2.22)$$

Según la ecuación (2.22) puede decirse, que la tensión es obtenida por la determinación de deformación en la región elástica. Aunque hay varios métodos para determinar la deformación, se usan ampliamente las galgas para medir la deformación, porque la tecnología de usar métodos de galga extensiométrica es la simplicidad de manejo y su alta precisión. Cuando la deformación ocurre, la resistencia eléctrica de una galga cambia y esto se ilustra en la ecuación siguiente (2.23):

$$\frac{dR}{R} = K\varepsilon \quad (2.23)$$

Subsecuentemente, la relación entre resistencia R y la sección de material se expresan como sigue:

$$R = \rho * \frac{L}{A} \quad (2.24)$$

Vaughan (1975) menciona que una viga bajo una carga de tensión simple, ésta incrementa en su longitud y al mismo tiempo es correspondiente a un decremento en la sección transversal. Este es conocido como el efecto Poisson, de manera que la deformación es medida en cualquiera de los planos perpendiculares correspondientes a la carga aplicada, una deformación negativa con valores muy pequeños será detectada. La magnitud de esta deformación es pequeña dependiendo de la relación de Poisson (μ), y esta constante varía de material a material. Este usualmente es sobre 0.3, así que la deformación medida perpendicular a la carga será aproximadamente 0.3 veces la deformación paralela a la carga.

2.2.9. Puente de Wheatstone

Es un dispositivo eléctrico que es normalmente usado para medir $K=dR/R$ y para convertir esta medición de cambio de resistencia en deformación; se utiliza el potenciómetro y el puente de Wheatstone como se muestra en la figura (2.15). El puente de Wheatstone puede determinar lecturas de galgas de tensión dinámica y estática. El voltaje de excitación puede ser CA o DC.

De esto se puede desprender la ecuación (2.25).

$$V = \frac{U * FG * n * \epsilon}{4} * Ganancia \quad (2.25)$$

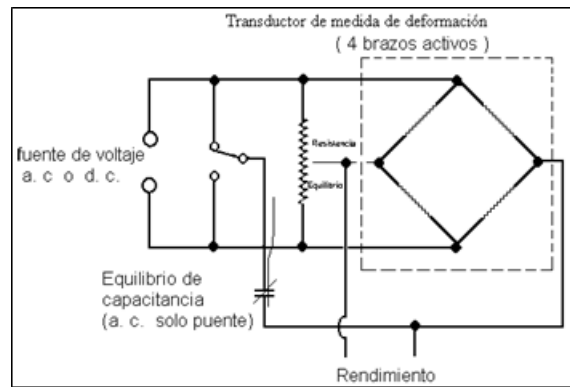


Figura 2.15: Puente de Wheatstone (Godwin, 1993).

2.2.10. Sistema de adquisición de datos

Rogers y Johnston (1953) citado por Ozuna (2011) indican la necesidad del procedimiento de datos de las fuerzas que actúan sobre los implementos. Usaron un cilindro de simple efecto para los brazos de enganche de tres puntos del tractor. Las líneas de presión de estos cilindros fueron ruta para las galgas montadas sobre un equipo. Durante la operación de este sistema el equipo fue fotografiado con una cámara de video de 16 cuadros. Aparentemente el procesamiento de datos para las fuerzas fue obtenido de un análisis de foto por foto de la filmación. Ellos fueron capaces de grabar las fuerzas en intervalos de distancias de 0.05 m en el campo. Neuholff (1959) describe la técnica de cómo se puede usar un analizador de deformación y registrarla para medir la suma de dos fuerzas simultáneamente.

Campos *et al.*, (2000), describen la necesidad de un sistema de alta velocidad de muestreo para la reproducción de las fuerzas de reacción del suelo que incluye transductores de magnitudes de fuerzas y su localización; en cuanto al hardware en varias investigaciones se puede identificar en todas y cada una de ellas, un sistema de acondicionamiento de señales provenientes de los sensores de fuerzas, un sistema convertidor analógico a digital y software para su funcionamiento (Moo, 1999). El anterior sistema permite reproducir en términos de energía lo que está sucediendo en interacción suelo herramienta. Moo (1999) desarrolló un sistema de adquisición de datos de laboratorio y campo que

permite evaluar el desempeño de los implementos de labranza, además muestra el diseño de medidores de velocidad y desplazamiento. Campos (1993) menciona que dentro de la adquisición de datos en laboratorio: comprende de un tanque de suelos el cual el sistema y los transductores se adaptan a éste. Y para el análisis de información proveniente de los procesos de muestreo (conversión analógica a digital) se utilizó la metodología del algoritmo de la transformada rápida de Fourier para la obtención de potencia espectral.

Kheiralla y Azmi, (2002) desarrollaron un sistema completo de adquisición de datos de instrumentación y fue desarrollado e instalado en un tractor Massey Ferguson 3060, tractor agrícola para poder mapear la energía y la demanda energética en la operación en campos de agrícolas en Malasia.

El sistema de instrumentación es capaz de medir y visualizar información sobre la velocidad del motor, la velocidad de toma de fuerza, velocidad de avance, deslizamiento de las ruedas de accionamiento, hectáreas (ha) trabajado, el consumo de combustible por hora, el consumo de combustible por ha, ha por hora, factor de costo, combustible consumido, el combustible restante, y la distancia. Los ensayos de campo muestran que el sistema es capaz de funcionar con éxito sin dar mucho problema. Todos los sensores son capaces de escanear y grabar el registro de datos en los entornos hostiles de campo. En la Figura (2.16) se muestra el diagrama de bloques en donde se ven los componentes del sistema de adquisición de datos.

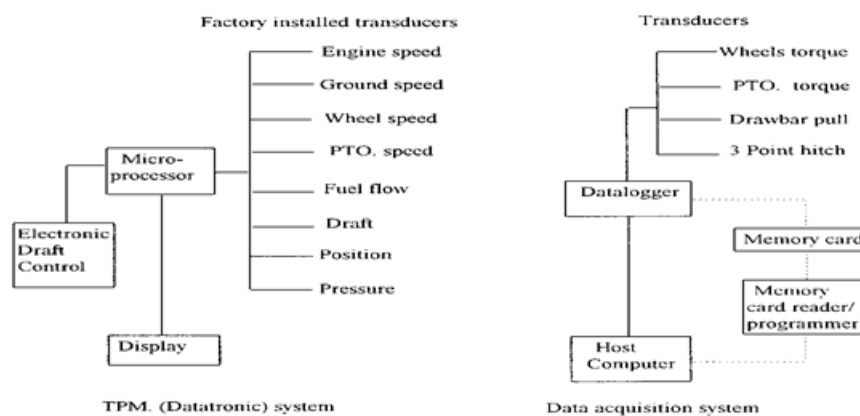


Figura 2.16: Diagrama de bloques del sistema de instrumentación del tractor (Kheiralla y Azmi, 2002).

El DaqBook/2000® (figura 2.17) es un dispositivo de adquisición de datos donde podemos observar las diferentes entradas analógicas de medida, entradas de frecuencia, y entradas digitales. El DaqBook200/2000 está equipado con una función de señal con una capacidad, que puede ser ampliado y mejorado con más de 40 canales.



Figura 2.17: Dispositivo de adquisición de datos DAQBOOK/2000.

La serie DaqBook/2000® incluye un orden interfaz interno Ethernet (red de área local) de 10/100Base. Capaz de realizar la transferencia de los datos adquiridos de nuevo a la PC en la lectura total de 200/s de medición.

2.3 Agricultura de Precisión (AP)

En las últimas dos décadas, gracias a la disponibilidad de las nuevas tecnologías geo-espaciales, se ha comenzado a administrar las explotaciones agrícolas de forma más precisa, recolectando y almacenando información espacial de diversas variables, como puede ser cultivo, suelo, altitud, clima y otros. Este conjunto de tecnologías que mejoran la gestión de la producción agrícola reciben el nombre de Agricultura de Precisión (AP) (Bramley, 2009).

La Agricultura de precisión (AP) es una técnica para aumentar la productividad, rentabilidad, mediante la diferenciación de sectores “homogéneos”, busca dar un manejo diferenciado de manera que las áreas agrícolas expresen su máximo potencial (Ortega y Flores, 2008). La AP requiere información de posicionamiento satelital, no obstante ésta no indica lo que hay que hacer en el campo, sino que permite a través de ciertas herramientas dar a cada zona del campo cultivado el tratamiento agronómico más apropiado, tomando en cuenta el aspecto económico, productivo y ambiental.

Bragachini *et al.*, (2004) la Agricultura de Precisión es una tecnología que utiliza herramientas de información (figura 2.18); (basada en el posicionamiento satelital y que consiste en obtener datos georreferenciados en los lotes para un mejor conocimiento de la variabilidad de rendimiento, expresado por los cultivos en diferentes sitios como loma, media loma y baja loma y se obtiene mejor respuesta en lotes que posean alta variabilidad de potencial de rendimiento ya sea por relieve, historial del lote (secuencia de cultivos y fertilizaciones anteriores). También con esta tecnología es posible ajustar la mejor dosis de fertilización para cada sitio o lote específicamente, el mejor híbrido, variedad, densidad de siembra, espaciamiento entre hileras, etc. Los beneficios se pueden resumir valorando el análisis y diagnóstico posible a realizar, partiendo de más de 800 datos de rendimiento por hectárea versus el análisis del promedio de rendimiento de todo un lote que ofrece la agricultura tradicional sin la ayuda del monitor de rendimiento satelital.

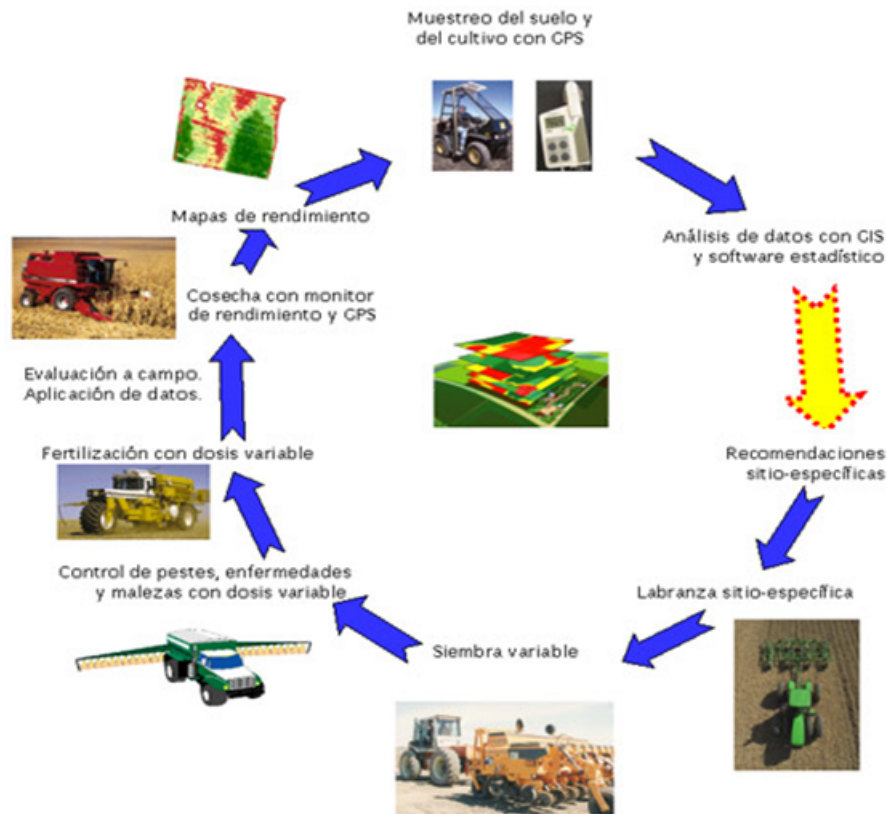


Figura 2.18: Herramientas para la agricultura de precisión, Bragachini *et al.*, (2004).

Bolstad, P. (2005). Menciona que dentro de la AP, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) están integrados por un hardware y un software los cuales capturan y almacenan datos. Si bien la agricultura de precisión es un tema relativamente nuevo, se han logrado muchos avances, principalmente en el desarrollo de máquinas e implementos que permiten el manejo localizado en base a mapas. Los recursos más avanzados en tecnología de información hoy disponibles, como los sistemas de posicionamiento global (GPS), los sistemas de información geográfica (SIG), los sistemas de control y adquisición de datos, sensores y actuadores, entre otros, están cada vez más presentes en el campo. A pesar de ese avance tecnológico, hay áreas que necesitan desarrollarse aún más para que la agricultura de precisión pueda consolidarse como una solución amplia y plenamente viable, para todos los segmentos de la agricultura.

La agricultura de precisión suele dividir este conjunto de tecnologías en tres grandes etapas:

- Recolección de datos.
- Análisis, procesamiento e interpretación de la información
- Aplicación diferencial de insumos.

El término Agricultura de Precisión (AP) se utiliza para referirse al manejo de los campos agrícolas de forma individualizada y específica. En la práctica se resume en “hacer lo correcto”, en “el lugar adecuado” y en “el momento preciso”, de forma automática, utilizando sensores, ordenadores y otros equipos electrónicos (Lowenberg, 2001). En el Cuadro (2.6), se presentan las principales etapas o pasos para la aplicación de AP las tecnologías involucradas y las actividades realizadas.

En base a ello, se define un ciclo de prácticas agrícolas orientado a sustituir la recomendación habitual de insumos en base a valores promedio, como ocurre en la agricultura tradicional, por una más precisa, con manejo localizado, considerando las variaciones del rendimiento en toda el área. Es una optimización del uso de los insumos porque deposita en el suelo la cantidad de semilla que cada punto soporta, la cantidad de nutrientes y agua requerida, y además el control de malezas, plagas y enfermedades se hace solamente en los puntos que lo demanden (Best, 2007).

Bragachini (2010) La agricultura de precisión no es una agricultura en la que los satélites indican lo que hay que hacer en el campo; si no que permite a través de ciertas herramientas dar a cada zona del campo cultivado el tratamiento agronómico más apropiado, tanto desde el punto de vista económico-productivo como el ambiental, permitiendo:

- Reducir los costos en la producción.
- Aumentar la productividad.
- Hacer un uso más eficiente de los insumos.

Cuadro 2.6: Etapas para la aplicación de AP (Adaptado de USDA, 1998).

ETAPA	TECNOLOGÍA INVO- LUCRADA	ACTIVIDADES
Recolección e ingreso de datos.	Sistemas de posicionamiento global (GPS).	Muestreo de suelos.
	Sistemas de información geográfica (SIG).	Recorrido de los cultivos para la detección de plagas y enfermedades.
Análisis, procesamiento e interpretación de la información.	Instrumentos topográficos.	Monitoreo de rendimientos.
	Sensores remotos.	Medición directa de propiedades del suelo y cultivos.
	Sensores directos.	Sensoramiento remoto de suelos y cultivos. Digitalización de mapas.
Aplicación diferencial de insumos.	Programas SIG. Sistemas expertos	Análisis de dependencia espacial.
	Programas estadísticos.	Confeción de mapas de evaluación prescripción.
Aplicación diferencial de insumos.	Tecnología de dosis variables.	Aplicación variable de nutrientes y de plaguicidas.
	Pulverización asistida por GPS.	Siembra diferencial de variedades y aplicación variable de semillas.
	Programa computacional.	

2.3.1. Impacto con el uso de la AP

El impacto de las tecnologías de AP en la producción agrícola se espera en dos áreas: rentabilidad para los productores y beneficios ecológicos y ambientales para la sociedad. En la rentabilidad la AP permite un seguimiento preciso y fino de la producción agrícola. Las tecnologías de AP proporcionan a los agricultores la oportunidad de cambiar la distribución y el momento de fertilización y otros agroquímicos basados en la variabilidad espacial y temporal en un campo. Los agricultores pueden hacer análisis económicos basándose sobre la variabilidad de los rendimientos de los cultivos en un campo para obtener una evaluación precisa de los riesgos.

Al conocer el costo de los insumos, los agricultores también pueden calcular el retorno de efectivo sobre los costos por cada hectárea. Ciertas partes dentro de un campo, que siempre producen por debajo de la línea de equilibrio, pueden ser aisladas para el desarrollo del plan de manejo de sitio específico. Los beneficios económicos resultantes de la AP, sin embargo, han demostrado ser difíciles de medir (Lowenberg - DeBoer, 1996). Griffin *et al.* (2000). La tecnología de tasa variable la VRT en comparación con la tecnología de tasa uniforme (URT) para la aplicación de fósforo en un arroz y rotación de soya en Arkansas, encontraron que la rentabilidad de la VRT fue altamente sensible a tanto P residual y el contenido de arcilla del suelo. Incluso cuando la VRT se encontró rentable en campos, que cambian de URT a VRT durante un horizonte de planificación de 10 años, pueden ser no aconsejables, ya que el aumento de los ingresos procedentes de los rendimientos no cubre el costo de la aplicación de VRT. Si un enfoque integral de la explotación, que toma todas las actividades de cultivo y las limitaciones de recursos en cuenta, es una adaptación de tecnología de AP y puede llegar a ser beneficioso para mejorar el potencial de ganancias y para reducir los riesgos (Oriade y Popp, 2000).

En lo que se refiere al medio ambiente en algunos países como Estados Unidos, Australia, Reino Unido, Dinamarca y Alemania han desarrollado leyes ambientales estrictas para reducir el uso de agroquímicos. Con la AP se ha reducido considerablemente el uso

de estos productos al ser aplicados con mayor eficiencia al suministrarlos en la dosis óptima y en las áreas donde se requiere. Sin embargo los beneficios ambientales que conlleva la práctica de la AP no han sido medidos sistemática y cuantitativamente.

Algunos investigadores han publicado evidencias positivas. En los sistemas de producción como la papa, la lixiviación de nitratos ha sido uno de los principales problemas. Un estudio realizado en dos campos adyacentes, uno tratado de forma tradicional en la fertilización nitrogenada y el otro con Tecnologías de Dosificación Variable (TDV), ha demostrado el efecto de las TDV al reducir la contaminación de los mantos acuíferos. Con la disponibilidad de datos topográficos para campos implementados con tecnologías de AP, se puede analizar la interacción entre labranza y erosión y por ende reducir la erosión.

2.3.2. Aplicación de la AP en el mundo

La investigación de la AP se inició en los EE.UU., Canadá, Australia y Europa occidental a mediados o finales de 1980. Aunque un considerable esfuerzo de investigación ha sido gastado, solo una pequeña parte de los agricultores han practicado algún tipo de tecnologías de la AP. La implementación de la AP ha sido principalmente a través de la utilización de la maquinaria de campo existente, mediante la adición de controladores y GPS para permitir las aplicaciones espacialmente variables. Hasta la fecha, el líder de la aplicación de AP todavía es la aplicación específica en sitio de fertilizantes. En Australia, el monitoreo y mapeo de la variabilidad espacial en el cultivo de granos pequeños, han recibido mucha publicidad. Los monitores de rendimiento de cultivos están disponibles para la papa, cosechadoras de maní y forraje y, todavía está en desarrollo para las cosechadoras de algodón. El número total de monitores de rendimiento granos que operan en Australia está por debajo de 200 en la actualidad, en comparación con EE.UU., que tiene entre 5000 y 10 000 unidades operativas (mitad con capacidad de DGPS).

El movimiento hacia AP en Australia se considera no fuerte (Whelan *et al.*, 1997). En Japón, el Ministerio de Agricultura ha comenzado a invertir en proyectos de investiga-

ción de AP, centrándose en la detección y los controles relacionados con la mecanización agrícola. Japón es caracterizado por una agricultura a pequeña escala y de mano de obra en base a manejo por individuo de la planta. La agricultura japonesa se ha enfrentado a muchos problemas graves durante las dos últimas décadas, incluyendo excedentes de arroz a la producción, la reducción rápida en la fuerza de trabajo en la agricultura, cambio de grupo de edad de los agricultores, y las crecientes preocupaciones ambientales. La agricultura japonesa es diversa en el tamaño del campo , la variedad de cultivos, la elevación del campo , el esquema de gestión de agua, el clima , el suelo, y similares. Se creía que las tecnologías de AP pueden encajar en diferentes escalas de granja, solo después de una reorganización de la estructura de la agricultura (Shibusawa, 1998). A pesar de que la mayoría de los experimentos AP se concentraron en aplicaciones VRT de fertilizantes y herbicidas, diversos tipos de tecnologías de AP han sido experimentados en todo el mundo. Los informes sobre experimentos AP en China, Corea, Indonesia, Bangladesh, Sri Lanka, Turquía , Arabia Saudita, Australia, Brasil, Argentina , Chile , Uruguay , Rusia, Italia , Países Bajos , Alemania , Francia , Reino Unido, Estados Unidos y Canadá han sido encontrados en la literatura reciente.

La tecnología VRT reciente ha sido probado con éxito en la región sureste de los EE.UU. (Heiniger y Meijer, 2000). La tecnología VRT también fue probada en los híbridos de maíz y la densidad de siembra en Colorado (Shanahan *et al.*, 2000). Bauer *et al.* (2000). Las pruebas de campo realizadas en Missouri para determinar las densidades de siembra óptimas en diferentes campos. Un experimento similar realizado en Kansas no mostró ningún beneficio económico mediante la variación de la tasa de plantación (Zhang *et al.*, 1999). En California, se está evaluando los potenciales de las tecnologías de la AP en la producción de arroz a través de un estudio intensivo (Roel *et al.*, 2000). También en California, un experimento fue llevado a cabo para estudiar la viabilidad de las tecnologías de la AP en la producción de tomate (Rosa *et al.*, 2000). En Costa Rica, se llevó a cabo un experimento para aplicar las tecnologías de la AP en una plantación de plátanos.

El sistema permite a los agricultores vincularse a una base de datos de suelos y tomar decisiones específicas del sitio sobre la fertilidad y los problemas relacionados con

las enfermedades del suelo a través de monitoreo de rendimiento. Un sistema de cable se utiliza para sustituir los caros sistemas de DGPS (Stoorvogel y Orlich, 2000). Johnson y Bradow (2000) estudiaron los efectos de una serie de propiedades del suelo, incluyendo Mn del suelo, Mg y K, en la calidad de la fibra de algodón en Luisiana y se cree que Tecnologías de AP pueden aplicarse para mejorar la calidad.

Giménez y Lamothe (2000) llevaron a cabo un experimento de campo en Uruguay para evaluar el beneficio de sitio específico en manejo de Zn y concluyó que el beneficio obtenido por la VRT en la aplicación Zn puede llegar a \$ 50 por hectárea. La AP también fue utilizada para optimizar las operaciones de riego. En Carolina del Sur, el estrés de agua en la planta se controló utilizando termómetros infrarrojos en un sistema de riego de pivote central para controlar el funcionamiento del sistema (Evans *et al.*, 2000). En Arizona, Adamsen *et al.*, 2000) estudiaron los sistemas de riego por gravedad y se encontró que la aplicación de agua es inherentemente no uniforme en estos sistemas debido a la variabilidad espacial y temporal de las características de infiltración del suelo.

Por lo tanto, el ajuste del diseño físico del sistema de riego o el desarrollo de manejo de prácticas específicas para campos individuales puede llegar a ser beneficioso para los agricultores. McKinion *et al.* (2001) aplicaron un enfoque de AP a la producción de algodón en Mississippi para automatizar el cálculo de agua óptima y dosis de N. Ellos creían que la AP, junto con los modelos de simulación de cultivos y SIG pueden optimizar los rendimientos y reducir al mínimo las entradas de agua y nitrógeno. El Control de plagas de sitio específico ha sido probado en diferentes cultivos. En el Reino Unido, el potencial para variar la tasa de nematocidas en los campos de papa fue estudiado por (Stafford y Evans, 2000). El Control del sitio específico de gusanos de la raíz del maíz del norte se estudió en el sur de Dakota (Ellsbury *et al.*, 2000). McLaughlin y Burt (2000) utilizaron sensores para la toma de fuerza en un enganche de tres puntos de un tractor para registrar los datos de la fuerza de tiro e hizo un mapa de labranza - energía en Ontario, Canadá.

Estos mapas pueden proporcionar una capa de mapa adicional, de bajo costo para obtener información relacionada con el suelo para aplicaciones de AP. La fuerza de tiro

sobre un arado de vertedera fue grabado por Hayhoe *et al.* (2000). Ellos aplicaron el análisis de Fourier sobre las señales periódicas de fuerza y encontraron que componentes de baja frecuencia de las señales pueden estar relacionados con la variabilidad espacial local en las propiedades físicas del suelo, tales como la humedad del suelo, la textura del suelo, la materia orgánica y fuerza / compactación del suelo.

En Wisconsin, Schuler y Lowery (2000) utilizan un sensor TDR en subsolador para medir el contenido de humedad del suelo, mientras que en el subsolado. La señal fue utilizada para controlar la profundidad de funcionamiento del subsolador para que coincidiera con diferentes condiciones del suelo. Tecnologías de AP se experimentó en el heno y la producción de forraje en Quebec, Canadá (Marcotte *et al.*, 1999). Los sensores que miden continuamente los pesos en la empacadora y el carro de arrastre y los sensores que miden simultáneamente flujo de masa y contenido de humedad se ensayaron. El desarrollo exitoso de estos sensores puede permitir varias aplicaciones de AP, incluyendo la selección de cultivares, la optimización de heno o ensilado, mapeo de rendimiento y el manejo del cultivo de forraje. Tecnologías de AP también se han utilizado en la producción de bosque. En Washington, el GPS receptores y registradores de datos se utilizaron para rastrear las actividades de máquinas cosechadoras (Reutebuch *et al.*, 1999).

2.3.3. Tendencias de la AP

En 1998, una encuesta a nivel nacional se llevó a cabo por el USDA sobre casi 8.500 productores agrícolas en los EE.UU. De acuerdo con los resultados de la encuesta, se estimó que, antes de 1998, solo cuatro por ciento de todas las granjas utilizan una o más tecnologías de AP para la producción de cultivos. Sin embargo, hay una variación significativa en las tasas de adopción por tecnología específica, región, tamaño de la explotación, tipo de explotación y las características del operador. La tecnologías más ampliamente adoptadas fueron de muestreo con cuadrícula (el 2% de todas las explotaciones) y VRT para fertilizantes (2%), seguido de control de rendimiento (1%) y mapeo de rendimiento (1%). La tecnología variable de semillas y aplicación de plaguicidas y de teledetección

(sensores remotos) se utilizan solo con menos de 1 % de todas las fincas.

El tamaño de la explotación, medido en términos de las ventas brutas, fue una correlación positiva con la tasa de adopción. Se encontró que las granjas de granos / semillas de oleaginosas tuvieron la mayor tasa de adopción (14 %), principalmente debido a la amplia disponibilidad de producir monitores. El índice de adopción de las frutas especializada, vegetal, y las granjas de nueces es del 5 %. La principal tecnología de AP utilizadas en estas explotaciones eran VRT para el control de plaguicidas (Daberkow y McBride, 2000).

Cook *et al.* (2000) encontraron que los agricultores de Australia están adoptando tecnologías AP más lentamente de lo esperado. Ellos atribuyen la lenta adopción a cuatro factores: (1) el costo de adopción , (2) la falta de percepción del beneficio de la adopción , (3) falta de voluntad para llegar temprano a los adoptantes , y (4) la falta de mecanismo de entrega de tecnología. Aunque el costo, la falta de percepción del beneficio, y el conservacionismo entre los agricultores, de hecho haber causado la lentitud en la adopción, el problema en la entrega de las tecnologías de la AP a los agricultores ha sido identificado como el principal obstáculo. La entrega de las tecnologías de AP para los agricultores requiere conocimientos y habilidades que la mayoría de las agencias de consultoría en la actualidad no poseen. El conservacionismo del sector de la consultoría parecía crear más dificultades que el conservacionismo de los agricultores en la adopción de tecnologías de la AP. En el Reino Unido, una encuesta fue realizada entre el 25 % de los cerca de 350 agricultores que son actualmente los que realizan mapas de rendimiento a través de GPS.

Los resultados de la encuesta mostraron que los adoptantes de mapeo de rendimiento han pasado la primera fase de captación inicial y entusiasmo y ahora están de pie en la segunda etapa de la implementación de la AP. Los agricultores que adoptan mapeo de rendimiento están en las necesidades urgentes de los buenos consejos de agrónomos sobre la interpretación de los mapas de rendimiento y su conversión en la gestión de planes. La Información de mapeo de rendimiento tiene que integrarse con sistemas de apoyo y decisiones para las granjas agrícolas (Griffin, 2000). Un estudio similar realizado en Arkansas indicó que los primeros en adoptar la AP representan menos del 20 por ciento de los agri-

cultores de Arkansas. Estos adoptantes son jóvenes, educados, utilizan un ordenador o equipo de cómputo y agricultores experimentados, con una gran cantidad de superficie de cultivo dedicada principalmente al cultivo de arroz y la soja. Mientras que los representantes del sector agrícola están ayudando a promover tecnologías de AP. Personal del Servicio de Extensión Cooperativa ha servido como la principal fuente de consulta técnica.

Los agricultores están a la espera de los resultados de investigación en la rentabilidad de las distintas tecnologías AP antes de aumentar su inversión de manera significativa a adoptar más tecnologías (Popp y Griffin, 2000). Los siguientes obstáculos que hay que superar antes de que las tecnologías de AP puedan ser ampliamente implementadas en un ritmo rápido:

- 1) Desbordamiento de datos para el manejo agrícola. Este problema tiene que ser superado por el desarrollo de herramientas de integración de datos, sistemas expertos y sistemas de soporte de decisiones.
- 2) La falta de procedimientos racionales y estrategias para la determinación de los requisitos de aplicación de forma localizada y la falta de pruebas en paralelo científicamente validada para los supuestos beneficios para el concepto de AP.
- 3) Mano de obra intensiva y costosa recopilación de datos. El desarrollo de detección rápida de sistemas debe tener lugar antes de que la AP pueda ser una práctica generalizada.
- 4) La falta de canales de transferencia de tecnología y personal. Los programas educativos con participación de investigadores, industriales, especialistas en extensión y consultores son urgentemente necesarios.

La Tecnología de AP probablemente debe ganar más reconocimiento cuando los beneficios adicionales, tales como cargas ambientales reducidos y aumento del flujo de información, se reconocen como un parte de su recompensa (Auernhammer, 2001).

2.4 Variabilidad del suelo

La variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo dentro de los campos agrícolas es inherente a la naturaleza geológica de la formación de suelo, pero en algunos casos la variabilidad puede ser inducida por la labranza y otras prácticas de manejo. Estos factores interactúan unos con otros, a través de escalas espaciales y temporales, y se modificarán una vez más a nivel local por los procesos de erosión deposición (Iqbal *et al.*, 2005).

La variabilidad de las propiedades físicas del suelo es generada por la intensidad de los procesos formadores del suelo y la influencia de factores antrópicos. Comprender la distribución espacial de estas propiedades, facilita las decisiones de manejo tomadas a partir de herramientas de información geográfica, las cuales permiten el manejo de cultivos a través de zonas de manejo agrícola o agricultura de precisión y manejo por sitio específico (Cruz *et al.*, 2010). La caracterización de los patrones espaciales de variabilidad es de creciente interés para determinar los niveles de precisión con los cuales pueden predecirse los atributos de suelo a diferentes escalas (Figura 2.19). La asociación espacial entre estos atributos y rendimiento de los cultivos es necesaria en la aplicación de insumos en forma variable o tecnología manejo sitio-específico (MSE). Esta tecnología se fundamenta en la capacidad de reconocer la heterogeneidad dentro del lote de producción y adecuar el uso de insumos para cada unidad reconocida

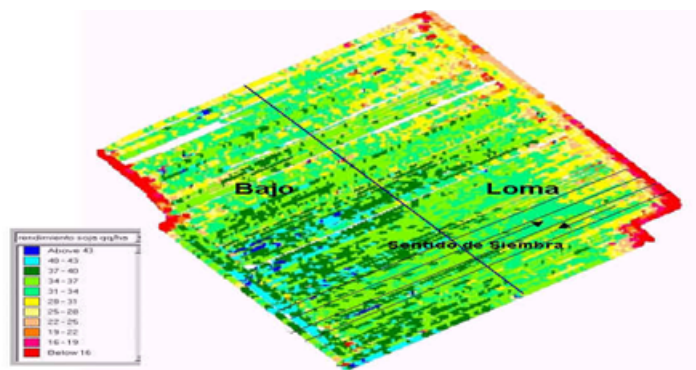


Figura 2.19: Mapa de variabilidad del suelo, siembra 2011 (www.wikiagro.com).

2.4.1. Clasificación de la variabilidad

La variabilidad que tiene un efecto considerable en la producción agrícola; se puede clasificar en seis grupos:

1. Variabilidad en Rendimiento

Está dada por la distribución de los rendimientos históricos y actuales.

2. Variabilidad del terreno

La variabilidad en el terreno está dada principalmente por su topografía, pendiente, aspecto; y la cercanía al límite del terreno y arroyos.

3. Variabilidad del suelo

La fertilidad del suelo o su contenido de N, P, K, Ca, Mg, C, Fe, Mn, Zn, y Cu; las propiedades físicas del suelo (textura, densidad, resistencia mecánica, contenido de humedad y conductividad eléctrica); propiedades químicas (pH, materia orgánica, salinidad, y capacidad de intercambio catiónico); disponibilidad del agua del suelo para las plantas, capacidad de retención de humedad, conductividad hidráulica y profundidad del suelo.

4. Variabilidad del cultivo

Densidad de plantas; altura de plantas; deficiencias de N, P, K, Ca, Mg, C, Fe, Mn, Zn, and Cu; estrés hídrico; propiedades fisiológicas (índice de área foliar), captación de la radiación fotosintéticamente activa y biomasa, contenido de clorofila de las hojas, y calidad de grano.

5. Variabilidad en factores externos

Infestación por malezas, insectos, nematodos; enfermedades; daño por viento y daño por acolchados.

6. Variabilidad en el manejo de cultivo

Prácticas de labranza; semillas mejoradas; densidad de siembra; rotación de cultivos; aplicación de fertilizantes, pesticidas y sistemas de riego. Dentro de estos tipos de variabilidad,

la variabilidad en el rendimiento a menudo se considera la última variable dependiente, mientras que la mayoría de los demás tipos de variabilidad son considerados como variables independientes. La variable independiente que más se ha estudiado hasta la actualidad es el nivel de fertilidad del nitrógeno del suelo. A decir verdad las tecnologías de dosificación variable para aplicaciones químicas que más desarrollo han tenido son los aplicadores de fertilizantes nitrogenados.

2.4.2. Tratamiento de la variabilidad

La gestión de la variabilidad se puede lograr mediante dos enfoques: en base a un mapa y en base a un sensor. Con las tecnologías disponibles de GPS, percepción remota, monitoreo de rendimiento y muestreo de suelo, la opción en base a un mapa normalmente es más fácil de implementar. Esta opción requiere del siguiente procedimiento: muestreo del suelo, analizar las muestras de suelo en laboratorio, generar un mapa de sitio específico y por último usar este mapa para controlar un dispositivo de dosificación variable. Para esta propuesta normalmente se requiere de un sistema de posicionamiento, como el GPS. Por otro lado, la opción basada en el uso de un sensor, mide las propiedades deseadas como las propiedades del suelo y planta usando sensores en tiempo real y de forma dinámica, controla dosificadores variables basados en las mediciones. Para los sensores no siempre es necesario un dispositivo de posicionamiento.

La mayoría de los sistemas de agricultura de precisión experimentales son sistemas en base a un mapa, porque la mayoría de los sensores en tiempo real para el monitoreo del campo, suelo y variabilidad del terreno son muy caros, no muy precisos o no están disponibles. Las bases de datos espaciales han sido generadas usando varios sistemas SIG integrando mapas derivados de sensores remotos, muestreo de suelo, monitoreo de rendimiento y varios sensores. Para analizar la variabilidad espacial y temporal se usan métodos geo-estadísticos avanzados. Se han integrado técnicas de modelado de cultivo para desarrollar mapas de potencial productivo que sirvan de referencia para la prescripción de fertilizantes. Estos mapas se pueden usar para predecir la variabilidad en el crecimiento del

cultivo y enfermedades basados en condiciones climáticas proyectadas. Para esto, la AP proporciona una herramienta ideal para la evaluación del riesgo agrícola y la planificación del trabajo de campo de forma racional.

2.4.3. Uso de herramientas estadísticas en la variabilidad

Los estudios que caracterizan el suelo también analizan diferentes atributos biológicos, físicos, químicos, hídricos y mineralógicos, descritos habitualmente por medio de técnicas estadísticas univariadas, con un número reducido de muestras. Esta técnica limita las interpretaciones y las conclusiones, por no explorar la existencia de dependencia conjunta entre las variables analizadas (Fidalski *et al.*, 2007).

2.5 Manejo de sitio específico

Las aplicaciones de insumos agrícolas por sitio específico se pueden implementar dividiendo un campo en zonas más pequeñas; que sean más homogéneas en las propiedades de interés que el campo en su totalidad. Un manejo de sitio específico se define como una porción del terreno que tiene una combinación homogénea de factores limitantes del rendimiento para los que se requiere de una dosis de un insumo agrícola en específico (Doerge, 1998). Así, el manejo de sitio específico en un campo puede ser diferente para los diferentes insumos. El manejo de un sitio puede ser delimitado por más de un insumo agrícola. En este caso, se aplica una dosificación simple para cada insumo dentro del sitio. El número de los diferentes sitios dentro de un mismo campo está en función de la variabilidad natural del campo, la extensión del terreno y ciertos factores de manejo. El tamaño mínimo de un sitio está limitado por la habilidad del agricultor para diferenciar regiones dentro de un campo. Si se utiliza un GPS para controlar la aplicación o para guiar el implemento, entonces no hay razón para restringir la forma del sitio. Sin embargo, en realidad, cuando se delimitan los sitios específicos se debe considerar el patrón que

seguirá el equipo de aplicación en el campo (Kvien y Pocknee, 2000).

El concepto de manejo de zona puede ser percibido como un retroceso desde el concepto inicial de la AP 'la agricultura a pie'. Sin embargo, las zonas de manejo son más prácticas de implementar. La delimitación de zonas de manejo implica filtrado espacial para reducir los efectos del ruido en las mediciones de los factores individuales. La eliminación del exceso de detalles en la variabilidad dentro de campo simplifica las formas de las zonas y, por lo tanto, reduce los requisitos para el equipo VRT. Chang *et al.* (2000) compararon diferentes enfoques para clasificar las zonas de manejo de nutrientes. Zhang y Taylor (2000) introdujeron los métodos de delimitación de zonas de manejo utilizando herramientas de filtrado espacial morfológico-y filtrado de herramientas espaciales.

En la tecnología MSE es imprescindible delimitar áreas homogéneas de manejo dentro del lote y se requieren mapas a escalas de elevado detalle (e.g. 1:1200 a 1:8000). El uso de metodologías de relevamiento tradicionales sería muy costoso para adecuar los mapas de suelos disponibles. La utilización de otras fuentes de información, tales como mapas de rendimiento e imágenes satelitales de varios años son valiosos para delimitar con mayor precisión las unidades cartográficas.

El valor de la información recolectada por los monitores de rendimiento radica en su elevado nivel de detalle. Sin embargo, la utilización de los mapas de rendimiento como única herramienta para delimitar áreas homogéneas de manejo puede ser poco consistente cuando se desconocen las fuentes de variabilidad de los mismos entre años (Gutiérrez, 2012).

2.6 Propiedades físico-mecánicas del suelo

Las propiedades físicas de los suelos, determinan en gran medida, la capacidad de muchos de los usos a los que el hombre los sujeta. La condición física de un suelo, determina la rigidez y la fuerza de sostenimiento, la facilidad para la penetración de las raíces,

la aireación, la capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua, la plasticidad, y la retención de nutrientes. Se considera necesario para las personas involucradas en el uso de la tierra, conocer las propiedades físicas del suelo, para entender en qué medida y cómo influyen en el crecimiento de las plantas, en qué medida y cómo la actividad humana puede llegar a modificarlas, y comprender la importancia de mantener las mejores condiciones físicas del suelo posibles. (Rucks *et al.*, 2004).

El estudio de las propiedades físicas del suelo tiene un papel preponderante en la caracterización de su productividad. En particular, la compactación afecta negativamente tanto en forma directa como indirecta diversas propiedades del suelo como la estructura, la dinámica del agua y el aire así como procesos de oxidación reducción y poblaciones de organismos, por citar solo algunos ejemplos (Henríquez y Cabalceta, 1999; Porta *et al.*, 2003).

2.6.1. Compactación del suelo y resistencia a la penetración

Por acción de presiones, una masa de suelo puede comprimirse, disminuyendo su volumen, modificándose el número y tamaño de los poros y aumentando la densidad aparente. Este proceso se conoce como compactación. Los cambios que ocurren establecen condiciones desfavorables para la conductividad hidráulica y la difusión de gases en la capa afectada. Todo el conjunto de disfunciones afecta el crecimiento de las plantas, en principio porque comprometen el desarrollo radical al aumentar la resistencia del suelo a ser horadado por las raíces (Atwell, 1993).

La compactación causa cambios en las propiedades físicas del suelo, aumentando la resistencia a la penetración y la densidad aparente y reduciendo la porosidad (Patterson, 1977). La compactación además reduce la velocidad de infiltración de agua, causa disminución en el drenaje, reduce la disponibilidad de agua y abastecimiento de aire y oxígeno utilizado por las raíces, Al incrementarse la densidad del suelo se crea una barrera física que no permite que las raíces penetren adecuadamente (Patterson *et al.*, 1980). La

compactación de los suelos puede ser evaluada a través de varios parámetros.

La medida de la resistencia mecánica a la penetración (RP) es una vía sencilla para detectar los cambios en el perfil que pueden relacionarse con la exploración de las raíces (Pires da Silva *et al.*, 2003). La variación espacial de la RP es más apropiada que la densidad aparente en la determinación de capas limitantes al crecimiento radical, porque presenta mayor sensibilidad en la detección de sectores diferenciados en grados de compactación (Jorajuria, 2004).

La resistencia a la penetración es un buen índice para evaluar problemas de restricción en el desarrollo radicular de las raíces de los cultivos, por la presencia de capas compactas y/o baja porosidad. La penetrabilidad del suelo permite conocer la facilidad con que un objeto puede ser introducido en él, es decir, la resistencia mecánica que ofrece el suelo a la expansión lateral y al corte que produce dicho objeto. Esa resistencia no es propiedad particular del material, sino que es la suma de los efectos de diferentes características y propiedades, tales como densidad aparente, contenido de humedad, resistencia a la penetración y al corte, las cuales a su vez, son consecuencia de la distribución del tamaño de partículas, de la estructura, y de la composición mineral y orgánica presentes en el suelo.

La resistencia mecánica del suelo es un importante parámetro que afecta el crecimiento de raíces, movimiento de agua y nutrientes. La manera más común para evaluar la resistencia del suelo es mediante el uso de un penetrómetro de suelo, el cual, caracteriza la fuerza necesaria para conducir el cono de tamaño específico en el suelo (Bradford, 1986). La resistencia a la penetración (RP) depende de las propiedades del suelo como son: densidad aparente, contenido de agua y la textura. Payan y Sánchez (2003), señalan que el penetrómetro es una de las herramientas más utilizadas en estudios de la calidad física del suelo.

El diseño del penetrómetro con captadores de fuerza y de distancia conectados a sistemas de adquisición de datos, permite conocer con gran rapidez la fuerza que opone

el suelo a la entrada del cono. Varios autores han empleado la resistencia a la penetración como indicador de la compactación en suelos agrícolas.

2.6.2. Humedad del suelo

La determinación del contenido de agua en el suelo o cualquier otro substrato es de gran importancia en muchas aplicaciones científicas e industriales tales como la agricultura, medio ambiente, construcción, industria alimentaria, ecología, hidrología y meteorología, entre otras; con el objeto de conocer los procesos de humectación-deseccación en relación con otros parámetros geo-ecológicos tales como presencia-ausencia de piedras superficiales, vegetación anual y/o perenne, etc. Este dispositivo debía ser una sonda de fácil instalación, costo moderado y volumen de medida reducido, con el fin de obtener una resolución espacial óptima (por ejemplo, medición de humedad en raíces de plantas) (Magan *et al.*, 2002).

La técnica TDR ha sido la que más difusión ha alcanzado para medir la humedad edáfica hasta superar los métodos considerados tradicionales (gravimetría, sonda de neutrones, resistencia eléctrica, etc.). La técnica TDR utiliza la correlación existente entre el tiempo de tránsito de una onda electromagnética introducida en el suelo, la constante dieléctrica de éste y el contenido volumétrico de humedad (Cassel *et al.*, 1994). La constante dieléctrica del suelo es la propiedad que determina dicho tiempo de tránsito. La velocidad de propagación ecuación (2.26) , V_p , de la onda generada por el TDR viene dada por

$$V_p = \frac{L}{t} \quad (2.26)$$

Siendo L la distancia a la que viaja la onda a lo largo de la línea de transmisión y t el tiempo requerido. Como quiera que el ecómetro registre el viaje de ida y vuelta a lo largo de las líneas de transmisión, quedaría:

$$V_P = \frac{2L}{t} \quad (2.27)$$

Siendo l la longitud de las varillas de la sonda o líneas de transmisión. La velocidad de propagación de una onda también puede escribirse como:

$$V_P = \frac{c}{\sqrt{K}} \quad (2.28)$$

Donde c es la velocidad de la luz en el vacío y K la constante dieléctrica relativa del medio. Igualando las ecuaciones (2.27) y (2.28), y despejando K , resulta:

$$K = \left(\frac{ct}{2}\right)^2 \quad (2.29)$$

Tops *et al.* (1980) a partir de la experimentación con un amplio rango de materiales porosos y contenidos de humedad, obtuvieron la siguiente ecuación empírica que relaciona K y el contenido de humedad volumétrica del suelo, ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$):

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} K - 5.5 \times 10^{-4} K^2 + 4.3 \times 10^{-6} K^3 \quad (2.30)$$

La universalidad de esta ecuación ha permitido la utilización del TDR (Figura 2.20) en suelos muy diferentes y ambientes contrastados. La técnica TDR ofrece una serie de ventajas entre las que destacan la rapidez de las mediciones, la posibilidad de realizarlas en un mismo punto de forma continua, establecer el perfil de humedad de un suelo mediante sondas instaladas a diferentes profundidades, un alto grado de precisión de las mediciones y un mínimo impacto sobre el terreno. Esta técnica se emplea también para la medición de la conductividad eléctrica de los suelos (Dalton, 1992).



Figura 2.20: Sonda TDR (FieldScout, marca comercial de producto).

2.7 Desarrollo de sensores aplicados en la agricultura

Los sensores son dispositivos utilizados para la medición de un estado, una condición (temperatura, humedad del aire, masa), flujo (de agua, aire, granos). Generan y envían tensión eléctrica al procesador y están constituidos de:

- Suministro de energía
- Elemento sensor
- Emisor de señal
- (eventualmente) acondicionamiento de señal.

Numerosos investigadores y fabricantes han desarrollado sensores “on-the-go” destinados a medir las propiedades del suelo mediante interacciones físicas con él mismo. Estos se pueden agrupar según su modo de interacción en: eléctricos y electromagnéticos, ópticos y radiométricos, mecánicos, acústicos, neumáticos y electroquímicos (Adamchuk *et al.*, 2004). En la última década del siglo XX han proliferado distintos sensores eléctricos y electromagnéticos, ópticos, mecánicos, electro-químicos, acústicos y neumáticos, que pueden ser incorporados a vehículos móviles para la caracterización del suelo. La mayoría de ellos tiene como característica común su sensibilidad a más de un factor agronómico del suelo como se muestra en el cuadro (2.7).

Cuadro 2.7: Sensores disponibles para el análisis dinámico de suelos y atributos evaluados con cada uno de ellos, (Adamchuk et al., 2004).

	Textura	MO	Humedad	Salinidad	Compactación	LS	pH	N	CIC
Eléctricos y EM	X	X	X	X		X		X	X
Ópticos	X	X	X				X	X	
Mecánicos					X	X			
Electro-químicos				X		X	X	X	

MO=materia orgánica LS=labor de suelo CIC=Capacidad de intercambio catiónico

2.7.1. Sensores eléctricos y electromagnéticos

El parámetro eléctrico a determinar es la conductividad eléctrica aparente (ECa en inglés, $-mSm^{-1}$ -) que es un promedio de la circulación eléctrica por tres vías distintas: 1) la fase líquida del suelo que tiene nutrientes disueltos, 2) la fase sólido-líquida debida al intercambio de cationes asociado con arcillas y minerales, y 3) la fase sólida derivada del contacto físico entre partículas sólidas; una explicación detalla de la contribución de cada uno de estos factores a la ECa puede encontrarse en Corwin y Lesch (2005).

Existen tres grandes casas comerciales que comercializan equipos para la determinación de las propiedades eléctricas del suelo: VERIS (3100), GEOCARTA (ARP), y GEONICS (EM31 y EM38). Las dos primeras emplean métodos resistivos (ER) sobre la base de una medida directa (DC) de la conductividad eléctrica y precisan la introducción en el suelo de electrodos, tanto de corriente como de voltaje. En estos equipos, se denomina configuración Werner a aquella que emplea cuatro electrodos alineados y equi-espaciados (figura 2.21), en la que los electrodos externos realizan la función de transmisión de corriente mientras que los internos efectúan la determinación del potencial. En este caso la profundidad de penetración de la corriente y el volumen de suelo evaluado aumentan proporcionalmente con la distancia entre electrodos (a), y en el caso de un suelo homogéneo el volumen evaluado es aproximadamente πa^3 .

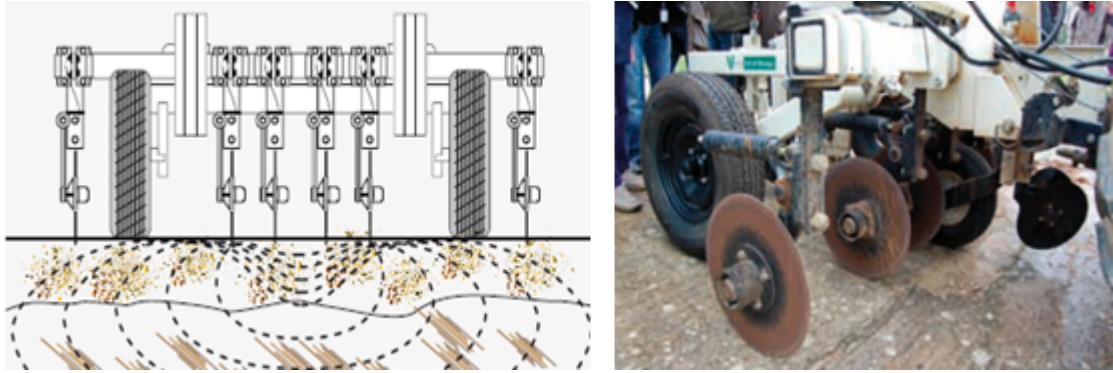


Figura 2.21: Disposición de los electrodos en equipos de muestreo de suelos (a) Modelo ERDC3100., con configuración Wenner y (b) ARP GEOCARTA. (www.veristech.com).

Los equipos comerciales basados en inducción electromagnética (EM) emplean corriente alterna que al circular por una bobina emisora generan un campo magnético en el suelo, que a su vez genera una corriente eléctrica en una bobina receptora (Figura 2.21). La señal es posteriormente amplificada y acondicionada en voltaje, siendo proporcional al volumen de suelo evaluado y a la ECa del mismo. Recientemente, GEONICS ha introducido en el mercado un equipo dual (EM-38 dual-dipolo) que dispone de una bobina horizontal y otra vertical que van alternando sus medidas cada varios segundos. Según Corwin y Lesch (2005), la relación de conductividades aparentes obtenidas con EM horizontal y EM vertical refleja las propiedades de conductividad hidráulica del suelo, y permite evaluar la lixiviación de nutrientes. Según estos mismos autores, la media geométrica en EMh y EMv está relacionada con las propiedades químicas de la fracción acuosa del suelo.

La medida de ECa revela la heterogeneidad del suelo debida a variaciones de textura, salinidad, materia orgánica, contenido en agua, y profundidad de la capa de erosión de arcilla. La Figura (2.22) muestra un ejemplo de mapeado de la ECa.

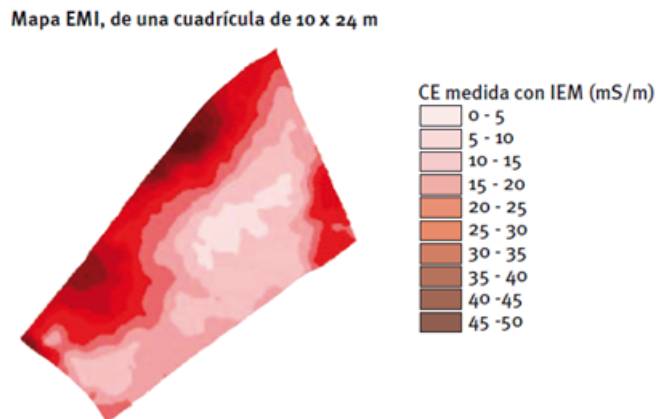


Figura 2.22: Ejemplo de un mapa de conductividad eléctrica aparente (ECa) Obtenido con un equipo EM38 (www.todoagro.com).

2.7.2. Sensores de tratamientos en tiempo real

La aplicación “en tiempo real” consiste en pulverizar los rodales de malas hierbas inmediatamente tras su detección. Se prevé una mayor aceptación de estos sistemas en el futuro y es donde se concentran los mayores esfuerzos, dado que la generación de mapas previos supone un gran costo debido al post-procesamiento de los datos.

El esquema más sencillo de un sistema de aplicación en tiempo real consiste en posicionar el equipo de detección en la parte delantera del tractor, utilizando el tiempo transcurrido desde la detección de las malas hierbas hasta la aplicación de herbicida por parte del equipo pulverizador situado en la zona trasera del tractor, para el procesamiento de la información recogida por el sensor delantero (Figura 2.23). En la actualidad, las aplicaciones en tiempo real están siendo utilizadas comercialmente en tratamientos de malas hierbas en las vías de tren, o en zonas urbanas (en las zonas de afloramiento entre las grietas del pavimento).

La detección de estos sistemas se realiza mediante espectroscopia, con sensores que en tiempo real distinguen la presencia de vegetación y no las especies vegetales, lo que permite un gran ahorro en el procesamiento de la información.



Figura 2.23: Sistema de tratamiento en tiempo real con sensor de vegetación situado al frente del tractor (cortesía de www.umwelt.fritzmeir.de).

2.7.3. Sensores mecánicos

La característica mecánica del suelo, tales como la resistencia del suelo (por lo general a través de la medición de resistencia mecánica) puede proporcionar información adicional útil sobre las condiciones del suelo (por ejemplo, la compactación). Regiones de alta resistencia mecánica en el suelo de forma natural pueden ser causadas por la compactación de la maquinaria agrícola pesada, o por la formación de pisos de arado. En cada caso, las partículas del suelo se colocan más cerca entre sí, y el proceso se refiere a la compactación. Los suelos compactados reducen las tasas de crecimiento de las raíces de los cultivos y así limitan la disponibilidad de agua y nutrientes a la planta (Upadhyaya *et al.*, 1999).

El penetrómetro de cono vertical estándar, se utiliza frecuentemente para medir la resistencia del suelo a la penetración (ASAE, 2002a), se cree puede ser la representación de la compactación del suelo. Incluso cuando las mediciones automatizadas del penetrómetro de cono son muy variables. Para superar estos problemas, una serie de prototipos de sistemas se han desarrollado para la detección “on-the-go” (en recorrido) de la resistencia mecánica del suelo.

Los medidores de deformación y células de carga, proporcionan una forma muy conveniente de medir las fuerzas que actúan en las herramientas de labranza, son relativamente baratos, muy robustos y son fácilmente interconectados a un sistema de adquisición de datos, lo que los hace ideales para aplicaciones en tiempo real. Las celdas de carga se utilizan habitualmente para medir la carga vertical, la fuerza lateral y momentos que actúan sobre implementos de labranza. Por ejemplo, en un estudio realizado por (Glancey *et al.*, 1996), la labranza en el lugar fue calibrada usando un enganche de tres puntos y dinamómetro en diferentes condiciones de suelo y en diferentes velocidades.

Alihamsyah *et al.* (1990) desarrollaron un sistema para el mapeo de la resistencia mecánica del suelo usando una cuña horizontal y penetrómetro de cono a una profundidad determinada. Los coeficientes de correlación entre las mediciones del penetrómetro horizontales y el estándar penetrómetro (vertical) se situaron entre 0,74 y 0,99. Un sistema de instrumentación para la medición de componentes horizontales y verticales de la resistencia mecánica a la labranza profunda fue diseñado por (Owen *et al.*, 1987). Del mismo modo, (Liu *et al.*, 1996) desarrollaron un diente equipado con una celda de carga para medir la resistencia del suelo al corte. Ellos plantearon la hipótesis, de que cuando un diente instrumentado se tira a través del suelo a una profundidad y velocidad constante, la fuerza requerida para tirar de la punta, es una función de la densidad del suelo (compactación), la textura y el contenido de humedad. Si la fuerza de corte del suelo se corrige para el contenido de humedad, un índice llamado índice de textura - compactación (TCI) se puede determinar. Dado que la textura del suelo no cambia con el tiempo, las TIC pueden utilizarse para inferir el nivel de compactación del suelo.

El sistema era capaz de estimar la resistencia mecánica del suelo en tres intervalos de profundidad. En este sistema, la señal relativamente baja en proporción de ruido hace que sea difícil predecir la resistencia mecánica del suelo cerca de la superficie. Otro prototipo de la cuchilla vertical (figura 2.24) equipado con una serie de medidores de deformación, se utilizó para estimar tanto el patrón espacial de la resistencia del suelo como para identificar la tendencia de cambio de la resistencia del suelo con la profundidad, suponiendo un cambio lineal de la presión de la resistencia con la profundidad (Adamchuk *et al.*, 2001).

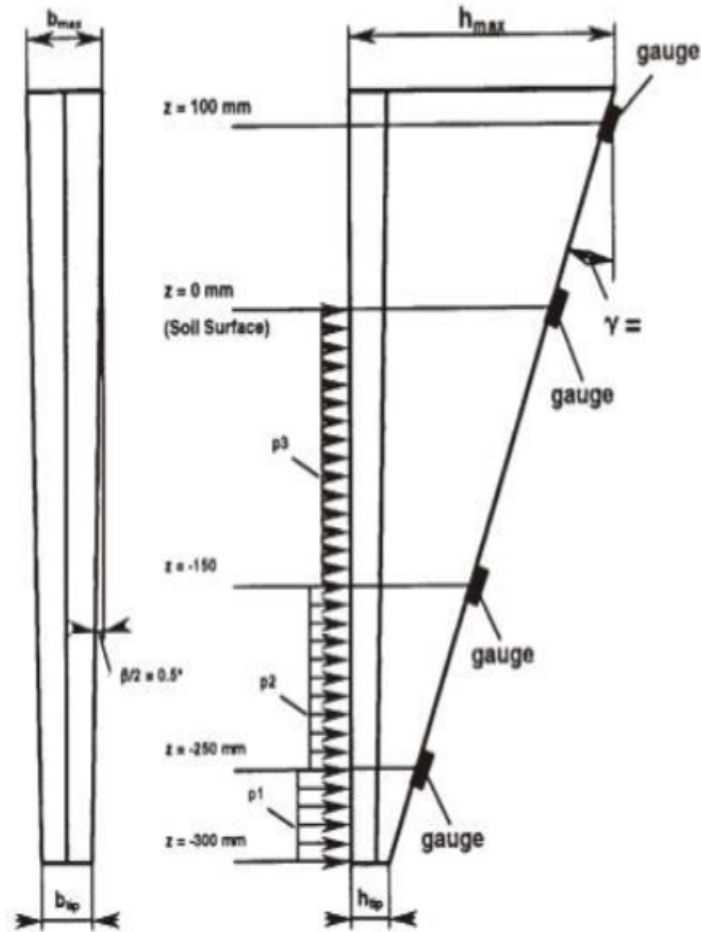


Figura 2.24: Esquema ilustrativo de cuchilla plana desarrollada por Adamchuk (2001)

Andrade *et al.* (2001b, 2002, 2008) desarrollaron un sensor con perfil de compactación que utiliza ocho celdas de carga independiente (Figura 2.16), situadas en el cuerpo del vástago para medir la fuerza de corte del suelo, actuando más de ocho elementos cortantes espaciados a 5 cm. Estos elementos de corte, se distribuyeron de manera uniforme sobre una profundidad de operación de 61 cm. Pruebas de campo indican que la fuerza de corte de suelo, fue pronosticado a partir de valores de índice de cono medido y que es comparable a la fuerza de corte real de suelo medido, utilizando el sensor de compactación del suelo.

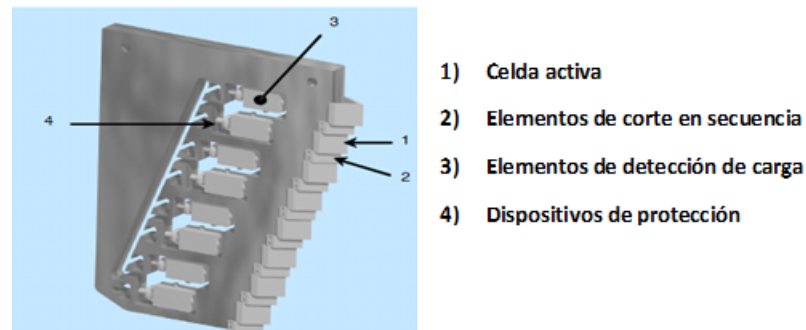


Figura 2.25: Modelo CAD del sensor de perfil de la compactación del suelo (SCP) desarrollado por (Andrade *et al.*, 2008).

2.7.4. Sensores de proximidad para la medición de profundidad

Son utilizados los sensores de posición, normalmente constituidos de reglas electro-ópticas, también se usan sensores basados en ultrasonido. Este mismo tipo de sensor es utilizado para la determinación de la altura de corte de los cabezales de cosechadoras de cereales y forraje (Silva & Borges, 1998). Son detectores de proximidad que trabajan libres de roces mecánicos y que detectan objetos a distancias de hasta 8 m. El sensor emite impulsos ultrasónicos, estos reflejan en un objeto, el sensor recibe el eco producido y lo convierte en señales eléctricas, las cuales son elaboradas en el aparato de valoración. Estos sensores trabajan solamente en el aire, y pueden detectar objetos con diferentes formas, colores, superficies y de diferentes materiales. Los materiales pueden ser sólidos, líquidos o polvorientos, sin embargo han de ser deflectores de sonido. Los sensores trabajan según el tiempo de transcurso del eco, es decir, se valora la distancia temporal entre el impulso de emisión y el impulso del eco.

El sensor ultrasónico LV-MaxSonar-EZ1 es un buen compromiso entre la sensibilidad y el rechazo de objetos secundarios. El sensor tiene integrado el receptor y transmisor en una sola capsula. Puede detectar distancias desde 15cm a 6 m. Ofrece señales de salida: analógica, digital por pulsos y de comunicación serial TTL. Referencia Web [1] http://www.dte.uvigo.es/recursos/proximidad/Sensores_Proximidad.swf

2.8 Sistema de posicionamiento global (GPS)

Un sistema de posicionamiento es aquel que permite identificar y registrar la posición de un objeto o persona sobre la superficie terrestre o en la atmósfera. Los sistemas actualmente disponibles son los siguientes: sistema de posicionamiento global y navegación estadounidense (NAVSTAR-GPS), sistema ruso global de navegación por satélite (GLO-NASS) y servicio europeo geostacionario de navegación (EG-NOS).

En el año 1978 se lanzó el primer satélite (Figura 2.26a) del sistema NAVSTAR-GPS (Navegación System Time and Ranging Global Positioning System), más conocido de forma abreviada por las siglas GPS. El sistema consta de 24 satélites (Figura 2.26b), distribuidos en 6 órbitas localizadas a unos 20.180 km de la superficie terrestre. Esta distribución garantiza que cualquier punto situado en la superficie terrestre, reciba en cualquier momento las ondas emitidas por al menos 4 satélites.

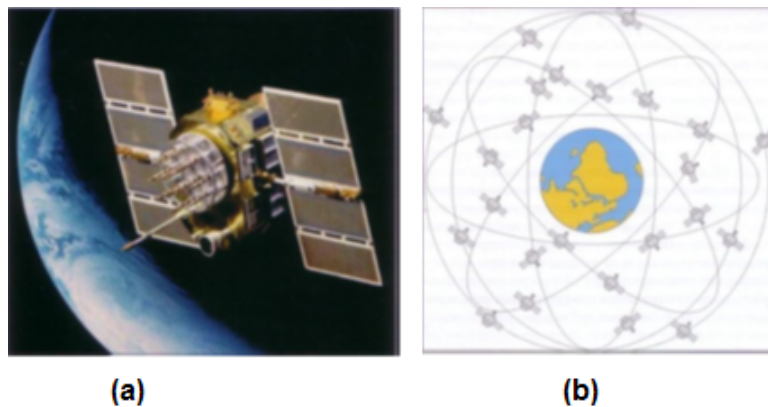


Figura 2.26: Satélites (a) NAVSTAR (b) Constelación de los satélites del sistema GPS.

Las siglas G.P.S. provienen del inglés: “Global Positioning System”, cuya traducción al español es: Sistema de Posicionamiento Global. Se trata de un sistema para determinar la posición en la Tierra, el cual, fue desarrollado por el Departamento de Defensa de Estados Unidos para constituir un sistema de navegación preciso con fines militares. En la actualidad, está bajo el control tanto de este departamento, como del de transportes, y sus aplicaciones se van extendiendo al ámbito civil (navegación, catastro, SIG, levantamien-

tos). El sistema está formado por 21 satélites operativos y 3 de reserva, los cuales están orbitando alrededor de la Tierra, a una altura aproximada de 20.000 km.

El Sistema GPS es muy fiable. En el caso de observaciones, en los que el receptor se ha situado durante suficiente tiempo en los puntos que se desean determinar, se han conseguido precisiones mayores del 99 % (Krüger *et al.*, 1994). Para mejorar la precisión surgió la técnica del GPS en modo diferencial: DGPS. Para utilizar el DGPS se necesitan dos receptores GPS. Uno de ellos actúa como estación de referencia, mientras que el otro será el equipo móvil con el cual el usuario se sitúa en los puntos cuyas coordenadas quiere conocer.

2.8.1. Composición global (GPS)

El sistema de posicionamiento global está compuesto por una red de 24 satélites denominado NAVSTAR, situados en órbita a unos 20.200 km de la tierra y los receptores GPS son los que permiten determinar la posición en cualquier lugar del planeta, de día o de noche y bajo cualquier condición meteorológica.

Los satélites procesan datos que permiten conocer su ubicación exacta y con relación a los otros satélites de la red. Cuando se enciende un receptor GPS portátil y se apunta la antena hacia el cielo, se reciben las señales de los satélites (el receptor GPS no emite ninguna señal, solo las recibe), empezando por las más fuertes, de manera que pueden empezar a calcular la distancia exacta hasta ese satélite, así como saber dónde buscar los demás satélites en el espacio.

Una vez que el receptor GPS ha captado la señal de por lo menos tres satélites, entonces puede calcular su propia posición en la tierra. Esa es la información que presenta en la pantalla como longitud y latitud. Si un cuarto satélite es captado, esto proporciona precisión a los cálculos y se muestra también la altitud calculada en la pantalla. Referencia Web [2]. <http://www.palermo.edu/ingenieria/downloads/pdfwebc&T8/8CyT12>

2.8.2. Correcciones diferenciales

A pesar de que la tecnología empleada en los sistemas GPS sea muy sofisticada y costosa, la determinación de la posición puede ser poco precisa debido a diversas causas, entre las que se pueden citar las siguientes: desfase entre la hora de los relojes del satélite y del receptor, desviaciones de las órbitas de los satélites, alteraciones producidas por la atmósfera terrestre, etc. A modo de comentario conviene resaltar que, hasta marzo de 2002, el Ministerio de Defensa de los E.E.U.U. Introducía errores en las señales emitidas por los satélites por motivos de seguridad.

Mediante la corrección diferencial se mejora la precisión en el posicionamiento de un punto que, en el caso de no hacerse, con el sistema GPS podría generar errores de posición comprendidos entre 20 y 30 metros. Para obtener la corrección es necesario emplear un segundo receptor, denominado estación base, situado en un punto fijo del que se conocen las coordenadas geográficas y la posición real respecto a los satélites (Cox, 2002). La corrección diferencial puede realizarse en tiempo real y procesarse posteriormente. El sistema más habitual para realizar las correcciones diferenciales es el GPS diferencial (DGPS). Las estaciones base situadas en la tierra calculan el dato de corrección, lo transmiten a un satélite geoestacionario que, a su vez, realiza la transmisión a los receptores (ver Figura 2.27). Como se puede observar en la figura, la estación base (1) recibe las señales de los satélites GPS (2), efectúa la corrección de sus posiciones y las transmite al satélite geoestacionario (3). El receptor (4) recibe las señales GPS y la corrección diferencial. El sistema DGPS tiene la ventaja de conseguir una precisión en torno al metro, con el inconveniente de que el servicio lo gestionan empresas especializadas (OMNISTAR, LANDSTAR) a cambio de un pago.

Otro sistema de corrección, es el RTK (Real Time Kinematic). Al igual que con el DGPS existe una estación base (figura 2.28), pero que, en este caso, envía la información de la corrección vía radio al receptor (situado a unos 3-5 km de la estación base). Usando este método, se consiguen precisiones del orden de pocos centímetros.

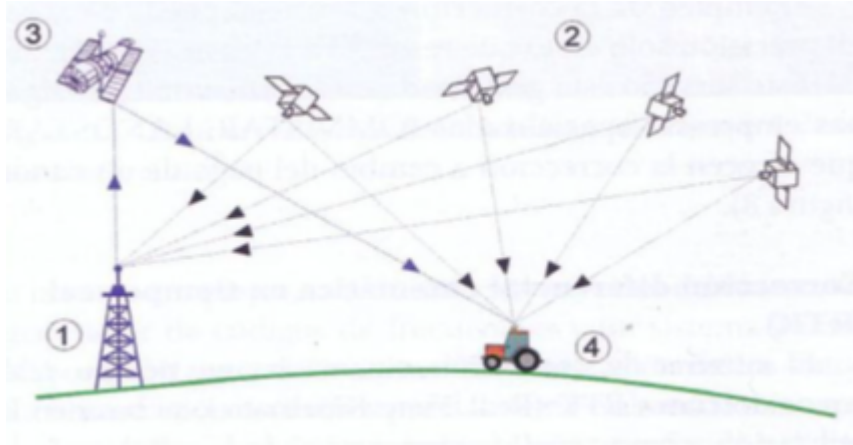


Figura 2.27: Corrección diferencial con un satélite geoestacionario.

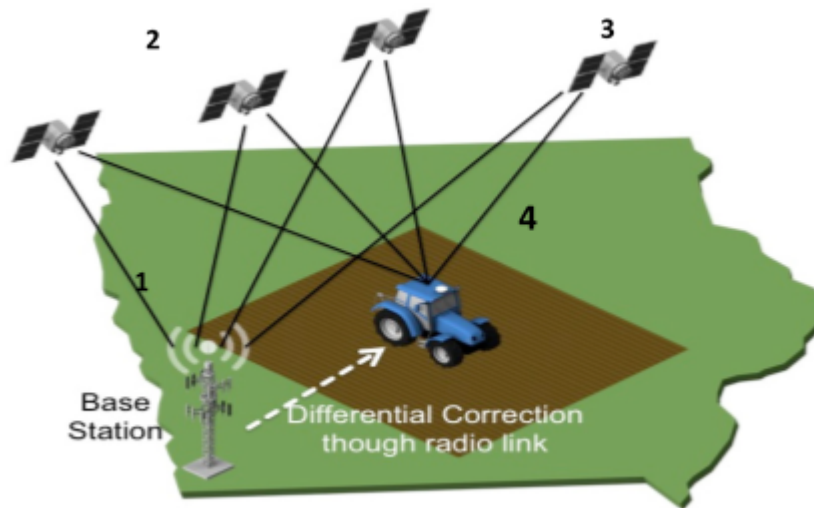


Figura 2.28: Corrección diferencial RTK (www.trimble.com).

2.8.3. Señales de corrección

Centerpoint RTK: Precisión menor a 2.5 cm. Inicialización/convergencia: menor a 1 minuto. Centerpoint RTK es más adecuado para establecimientos agrícolas a 12,5 km de una estación base RTK o red de estaciones base. Establecimientos agrícolas sin obstrucción visual, tales como terrenos empinados o una abundancia de árboles, usar con cultivos en surco, labranza localizada, nivelación de terrenos y aplicaciones de drenaje que requieren de la mejor precisión horizontal y vertical posible.

Centerpoint RTX: Precisión 3.8 cm. Inicialización/convergencia: estándar. Centerpoint RTX es más adecuado para establecimientos agrícolas de cualquier lugar del mundo establecimientos agrícolas alejados de las zonas de cobertura de estación base RTK. Usar con la pantalla integrada trimble FMX, la pantalla CFX750 o el receptor ag-372 Glonass. Usar con cultivos y aplicaciones que necesiten precisión de 3.8 cm.

Omnistar XP: Precisión 8-10cm. Inicialización/convergencia: estándar. Omnistar XP es más adecuado para aplicaciones de siembra localizada y pulverización de cultivos con alta precisión operaciones en zonas con clara visibilidad del cielo en todo momento.

Omnistar G2: Precisión 8-10 cm. Inicialización/convergencia: estándar. Omnistar G2 es más adecuado para utilizar cuando se necesite un tiempo de cobertura más confiable, al usar satélites Glonass además de los satélites GPS normales. Operaciones en zonas con clara visibilidad del cielo en todo momento.

2.9 Sistemas de información geográfica (SIG)

Un sistema de información geográfico (SIG), es un término que describe un sistema basado en un computador que tiene la capacidad para ingresar, almacenar, manipular y presentar datos que están geográficamente referenciados (datos espaciales) (Earl *et al.*, 2000). Identificar lugares en un determinado entorno geográfico que cumpla con un cri-

terio de selección específica. Explorar relaciones entre grupos de datos en un entorno geográfico previamente definido.

Analizar la información espacial relacionada a un entorno geográfico como ayuda a la toma de decisiones. Facilitar la selección y traspaso de información a modelos analíticos capaces de evaluar los impactos que originarían la elección de una u otra alternativa en un entorno geográfico previamente definido. Permitir la visualización gráfica y numérica del entorno geográfico definido ya sea antes o después del análisis.

En general, un Sistema de Información Geográfico consiste en la unión de información y herramientas informáticas (programas) para su análisis con unos objetivos concretos. En el caso de los SIG, se asume que la información incluye la posición en el espacio (Alonso- Sarría, 2000). En GIS, los datos acerca de la superficie de la tierra no se representan como un dibujo, como sucede con los mapas convencionales, sino como información o datos.

Estos datos de GIS contienen toda la información espacial de un mapa convencional, pero con la ventaja de ser mucho más flexible a la hora de representarlos, permitiendo además la obtención de nuevos mapas a partir de datos ya existentes. El término Sistema de Información Geográfica o SIG se aplica actualmente a los sistemas computarizados de almacenamiento, elaboración y recuperación de datos con equipo y programas específicamente designados para manejar los datos espaciales de referencia geográfica y los correspondientes datos cualitativos o atributos (FAO, 1999).

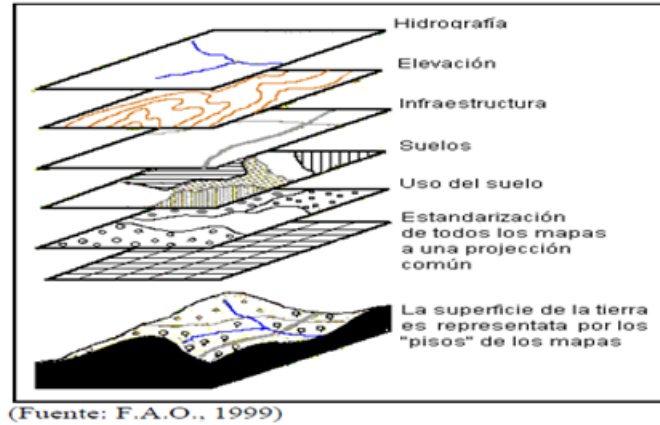


Figura 2.29: Capas de un SIG, (F.A.O., 1999)

En general, la información espacial se representa en forma de “capas” (Figura 2.29), en los que se describen la topografía, la disponibilidad de agua, los suelos, los bosques y praderas, el clima, la geología, la población, la propiedad de la tierra, los límites administrativos, la infraestructura (carreteras, vías férreas, sistemas de electricidad o de comunicaciones). El mayor logro de GIS es que todos los datos espaciales se almacenan de forma estructurada, en una base de datos espacial. La propia estructura de esta base de datos determinará la sencillez en el manejo del programa.

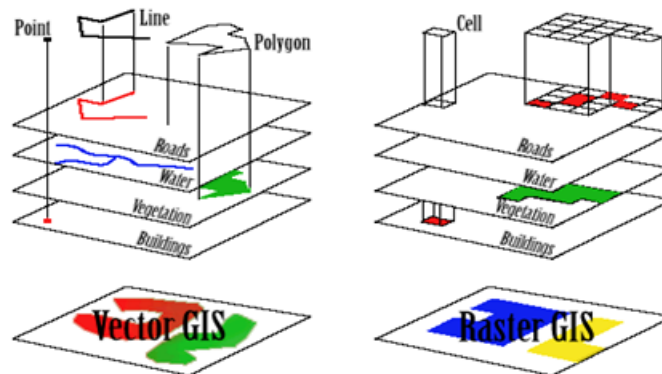


Figura 2.30: Resultados después de un rastreo satelital (F.A.O., 1999).

GIS utiliza dos modos de representación de los datos: modo vector y modo rastreo.

En el modo vector se considera que todas las características de la superficie de la tierra se pueden interpretar como un punto, línea o polígono. Cada característica almace-

nada en la base de datos de GIS debe estar especificada por su localización en la superficie de la tierra, y mantener relación espacial con el resto de características que le rodean, ver figuras (2.30 y 2.31). Este modo se refiere en aplicaciones urbanas. El modo rastreo es el preferido a la hora de trabajar con imágenes digitalizadas, datos remotos y análisis estadístico. En este modo se almacenan los datos en celdas (o píxeles), determinados según una rejilla, generalizando así la localización de características a una matriz regular de celdas. Por otro lado, los datos en GIS suelen almacenarse en diferentes capas, cada una de las cuales tiene una característica topográfica particular. Es decir, habrá una capa para los ríos, otra para vegetación, para asentamientos humanos, facilitando el acceso a datos concretos. Aparte de los modos de almacenamiento de los datos, en GIS también puede incluirse información no espacial, relacionada con cada punto o zona del mapa.

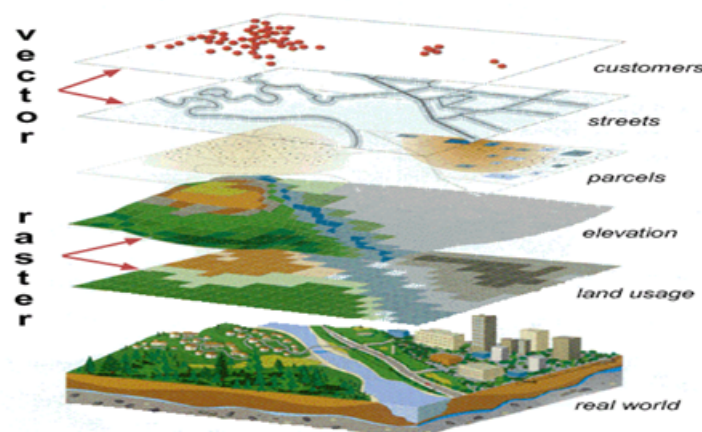


Figura 2.31: Generación de capas en GIS (Catastro, cartografía y SIGS, 2009).

Hasta ahora se ha mencionado el uso de GPS en la agricultura, pero por sí solo, no constituye a la Agricultura de Precisión. Se requiere de un sistema que permita el acceso a toda esa información recopilada de modo organizado, el manejo de los datos y análisis de los mismos, facilitando su interpretación y la toma de decisiones. Aquí es donde cobra importancia el papel de GIS, debido a todas sus características previamente mencionadas. Así a medida que la agricultura de precisión se expande, GIS se expande con ella.

2.9.1. Interpolación en SIG

La interpolación de datos ofrece la ventaja de proyectar mapas o superficies continuas a partir de datos discretos; sin embargo, la utilización de una buena cantidad de puntos del área en estudio limita su utilización (Johnston *et al.*, 2001). Dentro de los interpoladores usados existe un grupo llamado Kriging, nombre dado por su creador, el ingeniero en minas sudafricano D.G. Krige. Hasta el día de hoy, todos los interpoladores geoestadísticos están en el grupo de los Kriging (con sus variantes), los cuales ofrecen no solo predicciones y superficies de respuesta requeridas, sino también mapas de probabilidades y cuantiles (Johnston *et al.*, 2001).

El método IDW es similar al Kriging ordinario, ya que da más peso a los valores cercanos a un punto, pero posee una menor complejidad del cálculo. El IDW utiliza un algoritmo simple basado en distancias (Johnston *et al.*, 2001). El proceso de interpolación espacial consiste en la estimación de los valores que alcanza una variable Z en un conjunto de puntos definidos por un par de coordenadas (X, Y), partiendo de los que adopta Z en una muestra de puntos situados en el mismo área de estudio, la estimación de valores fuera del área de estudio se denomina extrapolación.

2.9.2. Mapas de rendimiento

Los mapas de rendimiento, permiten cuantificar la variabilidad de rendimiento existente durante la cosecha de un cultivo dentro del lote, quedando gravada espacialmente. La variabilidad de los lotes es uno de los factores que pueden justificar la realización de dosis variables en la siembra, fertilización, pulverización, etc. y gracias al GPS y algunas herramientas de la agricultura de precisión, entre ellas el monitor de rendimiento, podemos conocer el área que ocupa cada sitio y cuantificar sus diferencias de rendimiento.

La mayoría de los trabajos publicados relacionados a sistemas de determinación de producción para la elaboración de mapas de rendimiento están en el área de granos, donde

empresas como JOHN DEERE (1998), CASE (1999) y AGCO (1999) desarrollaron sensores de flujo de masa específicos para determinar la producción y la humedad de granos y software para manejar estos datos y generar los mapas de rendimiento (Biagi y Goes 2008). En Brasil, algunos trabajos importantes relacionados a Agricultura de Precisión también fueron realizados. Entre ellos podemos destacar el desarrollo, construcción y uso a campo, de un sistema de instrumental y adquisición de datos para el mapeo de producción en granos.

El sistema consistía en la medición automática de peso de los granos cosechados utilizando una sub-tolva granelera apoyada sobre cuatro células de carga dentro de la tolva de la cosechadora, sin ninguna modificación estructural de la misma, obteniendo un error máximo de 3,99 N para una capacidad de la sub-tolva de 4.905 N. La principal ventaja del sistema de pesaje automático, desarrollado por Elías, está en permitir la obtención directa del peso de los granos cosechados, sin necesidad de sensores para la medición del flujo de granos y calibración para cada cultivo (Biagi y Goes 2008).

Otro importante trabajo fue publicado por (Balastreire, 1998) que presenta el potencial de utilización de los conceptos de AP en el cultivo de la caña de azúcar. En su artículo el autor resalta entre los principales beneficios que la aplicación de este concepto puede ofrecer: a) posibilidad de reducción de impacto ambiental; b) beneficios económicos, donde la reducción del costo final del producto puede ser obtenida reduciendo los insumos en los puntos de bajo potencial de producción y re-diseccionándolo a los puntos de mayor potencial; c) ganancia de productividad, con aumento de producción y un aumento de la cantidad de azúcar de caña disponible.

Además según Balastreire el potencial de aplicar los conceptos de AP en el cultivo de la caña de azúcar se divide en cuatro puntos:

1. Mapa de suelo – este mostrará el potencial de fertilidad del suelo, y permitirá establecer las estrategias de aplicación de fertilizantes.
2. Mapa de cultivo – permitirá obtener mapas geo-referenciados de los tabloncillos del cultivo

en sus diferentes estadios.

3. Mapa de cosecha – se puede obtener un mapa de producción de cada celda dentro de un tablón. Con la geo-referenciación se tiene la localización exacta de cada celda, entonces, se puede verificar en el lugar cual fue el motivo de la baja de producción.

4. Aplicación localizada de insumos – la decisión sobre el mejor método de geo-referenciamiento del área puede ser hecho por medio de programas de computación específicamente realizados para la agricultura que proporcionan mapas de aplicación localizada de insumos. Con el auxilio de equipamientos especiales para el control de aplicación se puede aplicar la cantidad requerida en cada celda para así utilizar el máximo potencial de producción.

En un estudio realizado por Molin et al, (2004), validaron estadísticamente los modelos para medir la variabilidad espacial de la producción tomando como referencia un vagón con caña de azúcar en cosecha manual con alzada, demostrando que esta medición representa confiablemente la variabilidad en el campo.

Si bien es cierto con las herramientas AP se busca tener precisión de esta variabilidad, el concepto debe ser elevado a entender que el potencial agronómico es determinar las áreas de alta, media, baja producción y sus tendencias, su forma y distribución, procurar un detalle del metro o el centímetro no tiene sentido, partiendo del hecho que medir la variabilidad es el primer paso, pero el inmediatamente continuo es establecer qué y cómo se va a manejar esa variabilidad, allí un alto grado de precisión no aporta valor a la estrategia agronómica o al plan de manejo para incrementar la producción.

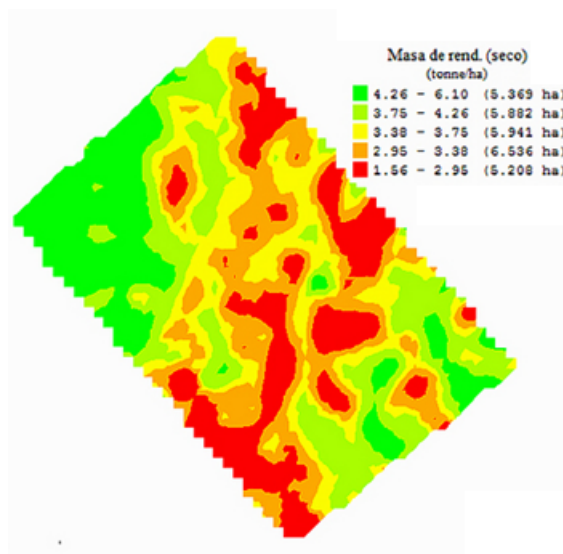


Figura 2.32: Mapa de rendimiento de maíz (Méndez et al ,2011): Proyecto Máquinas y Agro-componentes Precisos – INTA Manfredi.

2.9.3. Mapas de diagnóstico y prescripción

Los datos recogidos a través de las diferentes capas de información pueden ser: mapas de rendimiento de cultivos anteriores, fotografía aérea, mapas topográficos, imágenes satelitales, experiencias anteriores del productor o bien mapas de suelo de áreas homogéneas, todo permite definir dentro de un lote sitios con potencialidad de rendimiento muy diferentes, bien definidas. Si el área y las diferencias de rendimiento justifican agrónomica y económicamente el tratamiento diferencial de los insumos, se podría comenzar con la siguiente etapa, que consiste en la caracterización de los ambientes y posterior diagnóstico de la aplicación de insumos (semilla y/o fertilizante) en forma variable, estos cambios de dosis y densidades pueden lograrse dado que existen en el mercado navegadores – controladores - actuadores y GPS que posibilitan realizar los cambios de dosis y densidades en tiempo real siguiendo prescripciones o recomendaciones que son cargadas previamente en monitores de máquinas inteligentes.

La aplicación variable de insumos siguiendo una prescripción agrónomica puede realizarse en forma automática con el uso del GPS o en forma manual por medio de un

operario conocedor de la variabilidad espacial del lote, (Bragachini, 2005).

Mapa de Diagnóstico: Para los mapas de diagnóstico se utilizan métodos cartográficos para representar los resultados de la evaluación de los suelos de una determinada región. Se delimitará el área geográfica, recopilación de toda la información existente de la zona. Inventario de recursos (suelo, clima, topografía, vegetación y uso del suelo). Estudio de la interpretación de fotografías aéreas y manejo de mapas. **Mapa de Prescripción:** Los mapas de prescripción se obtienen de imágenes aéreas geo-referenciadas del lote, tomadas previamente para reflejar la densidad de malezas real presente en el lote. La clave para describir adecuadamente la variabilidad de las propiedades químicas del suelo que limitan el rendimiento es la obtención de muestras espacialmente dependientes para la interpolación y generación de mapas. A partir de estas imágenes y mediante el uso de un software GIS, se puede generar un mapa que nos permita delimitar las zonas afectadas por malezas. Los mapas de rendimiento sirven para evaluar si realmente el factor limitante de la producción (nutriente) fue eliminado o si además existen otros factores que impiden la respuesta aplicada. Para un correcto mapeo de rendimiento debe utilizarse un software especializado. Referencia Web [3]. <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2010/09/07/136442> La información que conforman los mapas de prescripciones pueden provenir de muchas fuentes (mapas de producción, sensores en el terreno, del cultivo, etc.), imposible de manejar mediante sistemas tradicionales. En este caso son los ordenadores, mediante aplicaciones informáticas especiales denominadas Sistemas de Información Geográfica para Agricultura (AgGIS), los que intervienen. Estas aplicaciones, además de almacenar ordenadamente toda la información, permiten su visualización así como su tratamiento estadístico para el cruce de los distintos datos. La creación de una base de datos de cada parcela es una herramienta fundamental para optimizar la toma de decisiones en un sistema productivo agrícola.

Estos datos generan capas de información tales como, propiedades químicas de los suelos, compactación, plagas y enfermedades, humedad, conductividad eléctrica, etc., y posteriormente serán utilizadas para la adecuada interpretación de la variabilidad espacial (dentro de la parcela) y temporal (entre años) de los rendimientos. Algunos de los mapas de

variabilidad que se utilizan actualmente en el sector agrícola son: mapas de rendimiento, mapas de vigor del cultivo, mapas de conductividad eléctrica (CE), etc. (Agüera y Pérez 2013).

2.10 Uso de procesadores y controladores en la AP

Tratándose del procesamiento de las señales, podemos ingresarlas a través de tres formas.

- Impulsos electrónicos;
- Señales análogas(que son convertidas en digitales), y
- Señales digitales (de llamados “sensores inteligentes”)

Los procesadores son dispositivos que comandan las decisiones de variación de dosis de aplicación de la máquina. Los microprocesadores leen los datos de entrada de los valores existentes (por ejemplo, velocidad), datos de entrada del usuario (por ejemplo, ancho de distribución), y calculan la dosis de aplicación basado en un algoritmo que contiene los parámetros de exigencia (kg/ha-1, l/ha-1 y otros). Un algoritmo es una secuencia de procedimientos y cálculos que relaciona los datos de entrada (de sensores, mapas y entradas vía consola) con salidas en forma de tensión de corriente eléctricas, o impulsos eléctricos, que controlan bombas responsables del caudal de producto, flujo de aire de transporte de material o válvulas que abren o interrumpen la salida de producto que está siendo aplicado.

Muchos controladores ejecutan tantas funciones y poseen tantos componentes como las computadoras personales. Los microprocesadores poseen memoria para almacenaje de datos e instrucciones, puertos para comunicación serial o paralela y una interface de comunicación visual (pantalla, teclado y otras). Muchos controladores usan la puerta serial (en general con protocolo de comunicación patrón RS-232), para comunicación con

computadoras y/o tarjeta (PCMCIA) para recibir datos de entrada y mapas de aplicación de insumos. Otros controladores, a su vez, sólo permiten la operación manual, por medio de teclas de mando para modificar los valores de dosis de aplicación, (Silva y Borges 1998).

2.10.1. Uso del controlador FMX TRIMBLE

Las computadoras que contienen los procesadores suelen ser controlados por un teclado común, con teclas móviles. Este dispositivo es más conocido y preferido. Posee más sensibilidad, pero permite más errores de digitación. Es la interface más reciente y moderna, pero no siempre el operador está con los dedos limpios, esto induce a errores de digitación, y dificultades de lectura en la región de toque sobre la pantalla. (Silva y Borges 1998).

Pantalla CFX-750: Es útil para monitorear y registrar información del lote para las aplicaciones de cultivos de cereales y cultivos en surco en tiempo real, es compatible con varias constelaciones de satélites y niveles de precisión por lo que es ideal para prácticamente cualquier lugar, tipo de cultivo, forma del campo o tipo de suelo. Trimble incrementa las posibilidades del GPS con otras tecnologías de posicionamiento; así como, también con comunicaciones inalámbricas y software para crear soluciones completas para el cliente. Pantalla Integrada FMX: La pantalla ayuda a controlar y registrar información de lote en tiempo real. Es una pantalla de guía avanzada con todas las prestaciones necesarias para encargarse de todas sus operaciones de agricultura de precisión: desde el registro de datos básico hasta operaciones avanzadas tales como control de aplicaciones, nivelación de terrenos o drenaje y cosecha, ver figura 2.33.

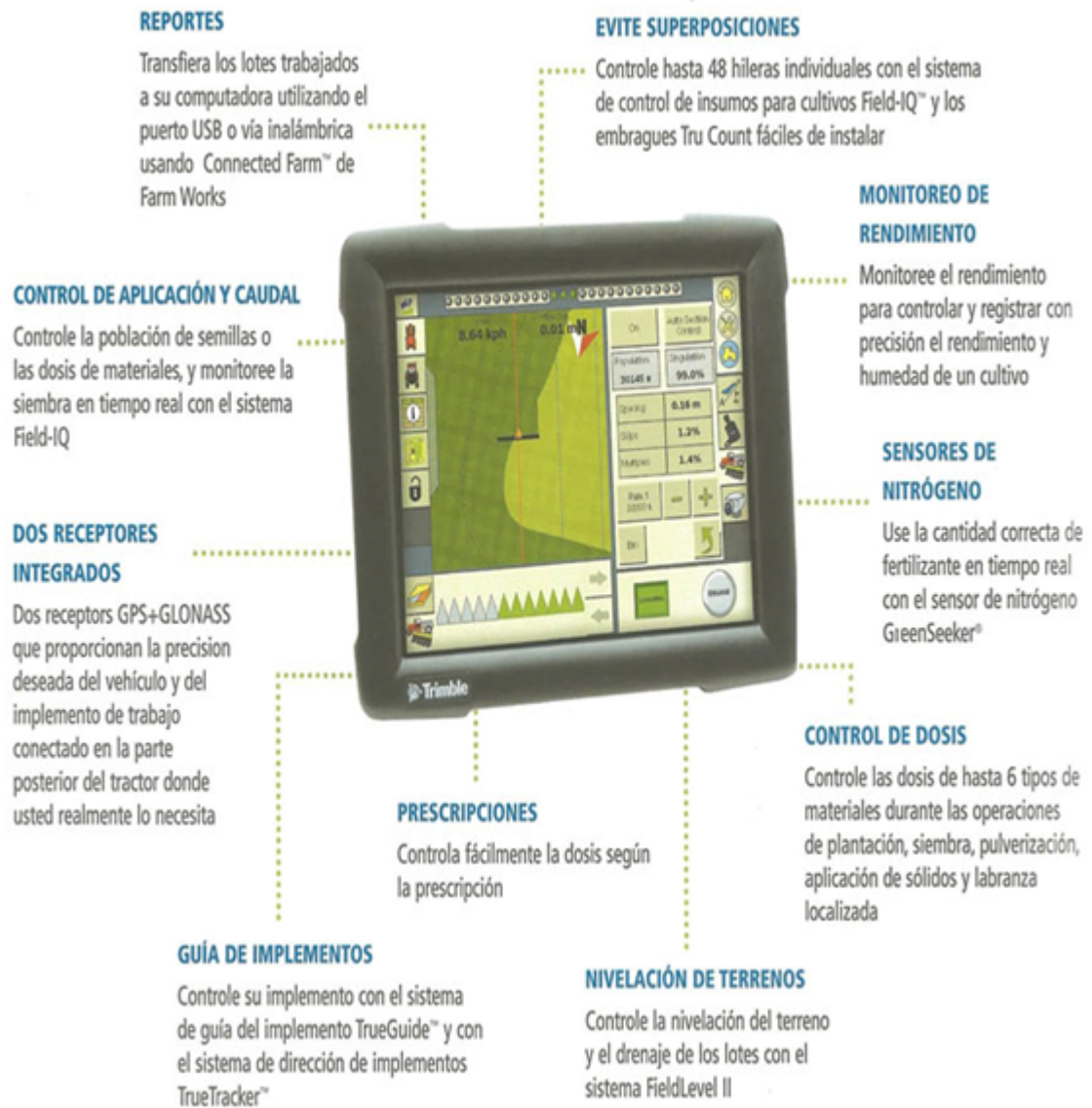


Figura 2.33: Funciones de la pantalla FMX. (Agrolaser nivel S.L., 2014).

2.10.2. Funcionabilidad

John Deere ha trabajado con la Agricultura de Precisión utilizando los monitores que son necesarios para ejecutar las aplicaciones de la AP, por eso resulta tan importantes: Monitor GS2 GreenStar™ 1800, para una flexibilidad sobresaliente, un guiado eficaz, vistas realistas del lote y control de aperos ISOBUS. Al estar diseñado a la medida para el conjunto de guiado automático John Deere AutoTrac Universal 200 (ATU), permite alternar entre diversos menús, uno para controlar más de una actividad de trabajo. Proporciona el control de todas las aplicaciones de guiado adicionales como Parallel Tracking o AutoTrac. El monitor GreenStar 1800 es compatible con el sistema de control de aperos ISOBUS y el sistema Sprayer Pro. Monitor GS3 GreenStar™ 2630: Proporciona el control total de todas las soluciones utilizadas en los tractores, enfardadoras, cosechadoras o pulverizadores John Deere.

Desde documentación y control de rendimiento por sistema guiado y avanzadas capacidades ISOBUS, el monitor GreenStar 2630 define nuevas fronteras en facilidad y comodidad de manejo y eficacia de trabajo. Receptores y señales de John Deere: Con la tecnología de guiado de John Deere usted puede aumentar la precisión cuando quiera paso a paso, con independencia del equipo que utilice. Es muy sencillo. Con los receptores StarFire se puede escoger entre 3 niveles de precisión, ajustando el rendimiento del sistema a sus necesidades: Receptor StarFire™ 3000: Recibe las señales de los satélites del sistema de posicionamiento global GPS y dispone de capacidad para utilizar las señales de la red de satélites rusos GLONASS, similares al sistema GPS. Esto mantiene el rendimiento de guiado, incluso en condiciones de mala recepción o de pérdida de señal por diversas circunstancias. Adicionalmente, este receptor está diseñado para captar satélites situados a una altura en el horizonte de tan solo 2 grados. Gracias a esta mayor capacidad de captación, el StarFire 3000 proporciona una posición más fiable. Referencia Web [4]. http://www.deere.com.ar/wps/dcom/es_AR/products/equipment/agricultural_management_solutions/displays_and_receivers/greenstar_2_display_1800/greenstar_2_display_1800.page

2.10.3. Manejo de la información

Después de más de una década de investigación y práctica, la AP ha acumulado una enorme cantidad de datos y ahora se enfrenta a un grave problema de “desbordamiento de datos”. Para la información espacial / temporal que se ha recogido, hay una necesidad urgente de herramientas diseñadas específicamente para el almacenamiento, procesamiento, gestión y análisis. También hay una fuerte necesidad de intercambio de datos de normalización.

Paquetes de SIG de propósito general, como ArcView, Idrisi y SURFER, proporcionan muchas funciones, algunas de las cuales ofrecen poco valor para aplicaciones de AP. La mayoría de estos paquetes son caros y requieren plataformas de computadoras que por lo general los agricultores no poseen. Para hacer frente a la urgente necesidad de aplicaciones de AP a nivel de campo, muchos paquetes de SIG comerciales, tales como los paquetes de software introducidas por AGRIS Corporation, FarmWorks™, Agri-Logic, Inc., John Deere y Precisión Farming Group, Case Corporation, Rockwell International, y RDI Technologies, Inc., se han desarrollado (Ess *et al.*, 1999).

Algunos sistemas interactúan directamente con dispositivos DGPS o sensores de rendimiento para la adquisición de ubicación y datos de rendimiento en tiempo real. Runquist *et al.* (2001) desarrollaron un SIG a nivel de campo (FIS) que contiene funciones analíticas para el análisis de datos espaciales en la investigación de la AP. Las tecnologías de AP son tecnologías basadas en la información. Como la cantidad de datos generados a partir de ambas fuentes móviles y estáticas aumenta la necesidad de estandarizar, se ha reconocido la comunicación de datos y de archivos.

Se han hecho grandes esfuerzos para establecer un estándar internacional (ISO-11783) para protocolos de comunicación en las máquinas móviles, agrícolas y forestales utilizando sistemas CANs para proporcionar intercambiabilidad entre los productos de sensores y actuadores proporcionadas por diferentes fabricantes y para permitir el diseño modular de nuevos productos. Archivos y formatos de datos se han estandarizado en la

norma ISO 11787 (en lo sucesivo ((ADIS '*/ norma agrícola de intercambio de datos) y están en uso por algunos fabricantes. Con estas normas, la información puede ser intercambiada sin problemas y eficientemente entre los sensores, procesadores, controladores y paquetes de software de diferentes fabricantes (Stafford, 2000).

2.10.4. Sistema Ag GPS Field Level

El sistema Field Level de Trimble, le permitirá automatizar el proceso de mapeo y nivelación de campos, reduciendo el movimiento innecesario de tierra y la pérdida de suelo fértil. Con un alcance 10 veces mayor que las alternativas basadas en láser, y sin limitaciones de elevación, Field Level permite reducir notablemente el tiempo necesario para las tareas de nivelación del terreno, además de permitir el trabajo con superficies no planas.

Toda la operación es realizada mediante un sistema GPS a tiempo real (RTK) Real Time Kinematic, (por sus siglas en inglés) y controlada a través de una computadora de campo AgGPS 170®, que muestra continuamente la elevación de la máquina. La computadora de campo AgGPS® 170 que maneja el software Ag GPS Field Manager almacena la información recolectada del GPS y datos de nivel mientras mapea el área que necesita nivelar. Cuando el área ha sido mapeada, la información es exportada al software de diseño AgGPS Multiplane de Trimble. El software AgGPS MultiPlane le ayudara a diseñar pendientes múltiples para mejorar el drenaje de su campo. Utilizando la información topográfica recolectada por el AgGPS 170® (ya sea de un receptor AgGPS o un láser), el AgGPS MultiPlane construye un modelo de la superficie. Con este modelo se puede diseñar un plan de nivelación con drenaje adecuado, para mejorar la producción. Cuando se esté nivelando el campo, el sistema AgGPS Field Level controlará automáticamente la cuchilla de la pala de arrastre o palón en base a la posición del tractor, mostrando continuamente la desviación entre la cota actual de la máquina y la de proyecto, y corrigiéndola para mover la tierra según el diseño del MultiPlane.

En suma, el sistema Ag GPS Field Level de Trimble proporciona una verdadera tecnología 3D para el mercado de agricultura. Los productores y contratistas tienen así mayor capacidad de nivelar superficies automáticamente, eliminando el repaso y reduciendo notoriamente los tiempos de trabajo. Referencia Web [5]. <http://www.agroads.com.ar/detalle.asp?clasi=204964>

2.11 Sistemas de control en la AP

Los sistemas de control automático en lo que consta a su operación, no tiene demasiada complejidad, algunos autores lo definen como algo esencial e indiscutiblemente primordial en nuestra sociedad. Navarro (2004), lo define como un conjunto formado por el proceso y el sistema de control. Para conseguir este objetivo son indispensables una serie de dispositivos adicionales, que de alguna manera lleven a cabo el control o regulación del proceso con el fin de sustituir la acción del hombre por un dispositivo llamado controlador o regulador. El conjunto que forman los componentes que llevaran a cabo el control automático de un proceso se le llama sistema de control automático.

Acedo (2006), define un sistema de control automático el cual mide una variable y actúa de una forma determinada, para que esa variable se mantenga en un valor deseado de referencia. Un sistema de control no automático, puede hacer cambiar el valor de la variable pero no llevarla al valor de referencia. En la actualidad existen plantas industriales que solo requieren para su operación de unas cuantas personas que supervisen sus procesos de producción, los cuales se realizan automáticamente bajo el control de sistemas computarizados. Estos sistemas efectúan el control directo de las variables, ajustan los parámetros de acuerdo a las condiciones de operación, informan a los operadores de las condiciones anormales de la planta y aun sugieren las acciones de corrección en caso de falla.

El desarrollo de los sistemas de control automático se ha logrado en poco tiempo ya que podemos considerar que este se inició, como conocimiento estructurado en la década de 1920, (Cavada, 1998). Acedo (2006), hace referencia sobre los controladores automáti-

cos en donde han incorporado una habilidad que corresponde al ser humano. Esa habilidad es la de (Sentir) una condición correcta o incorrecta y actuar para corregirla.

2.11.1. Sistemas hidráulicos

Los sistemas hidráulicos se han hecho imprescindibles en las máquinas agrícolas. La facilidad de manejo y la regulación automática de algunos órganos de las máquinas es posible gracias a que el accionamiento eléctrico y/o electrónico de algunos componentes a través de cilindros o motores hidráulicos. Los componentes básicos de un sistema hidráulico son: bomba, filtro, recipiente de almacenamiento de aceite, válvulas, actuadores, fluidos hidráulicos, todos estos elementos son unidos o conectados entre sí, por medio de tubos y mangueras.

Tipos de sistemas hidráulicos

Circuito hidráulico de centro abierto: caudal constante, presión variable con el sistema de centro abierto, la bomba es de cilindrada, y por lo tanto el caudal, constante. El sistema se implementa con bombas de tipo engranajes (normalmente el cuerpo se fabrica en fundición de acero o aluminio) que están accionadas de forma continua. Como la bomba envía de forma permanente un caudal constante se necesita una válvula que limite la presión ya sea bien para que el aceite retorne a depósito o bien cuando llega el final del requerimiento hidráulico. Es decir, si no se requiriese caudal entonces el flujo de aceite se desvía al depósito por la línea de retorno. En el caso de accionar un distribuidor (servicios externos, elevador...) la válvula de control orienta el caudal hacia la demanda, siendo la velocidad de respuesta directamente proporcional al caudal de la bomba. La presión subirá entonces hasta alcanzar el valor requerido para la función exigida en el actuador y tras realizar ese trabajo la bomba vuelve a funcionar bajo condiciones de baja presión, figura 2.34. Otra característica del sistema es que las bombas con caudal fijo una vez que se abre un distribuidor se consume la máxima potencia de que dispone el sistema hidráulico, incluso sin tener nada acoplado, porque el caudal excedente se tiene que ir por la válvula

limitadora (alivio de presión) El centro abierto es muy utilizado en tractores agrícolas ya que es de gran simplicidad en la disposición de los componentes, y porque es un sistema que se adapta perfectamente a la normal operación del sistema hidráulico en un tractor, es decir, de forma intermitente y con un número limitado de actuadores.

Pero el centro abierto también se usa en aparatos tan complejos como puede ser un avión si bien es cierto que normalmente se usa en aviones ligeros como avionetas en las cuales no se necesita un suministro continuo de presión (tren de aterrizaje o flaps) si no que necesitan suministro hidráulico durante un periodo corto de tiempo. Normalmente la presión nominal de trabajo en centro abierto oscila entre los 80 y los 130 kg/cm².

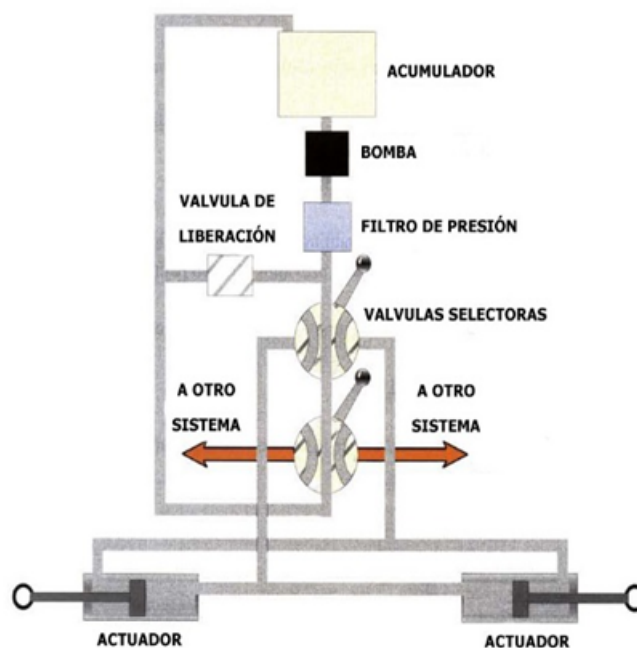


Figura 2.34: Esquema de sistema hidráulico centro abierto, (Más que máquinas, 2013).

Circuito hidráulico de centro cerrado: caudal variable, presión constante

El sistema de centro cerrado suministra aceite a la demanda capaz de suplir operaciones simultáneas y con una sola bomba. La implementación de estos circuitos se hace con bombas de caudal variable (cilindrada variable) pero manteniendo la presión. Cuando el circuito no requiere caudal la bomba está en cierto reposo y el aceite no retorna conti-

nuamente al depósito mientras que mantiene la presión del aceite en un margen estrecho de variación. La cilindrada de la bomba varía en función de la carga del sistema proporcionando el caudal a la demanda y siempre manteniendo la presión dentro de límites estrechos. En el caso de necesitarse alimentar varios actuadores en paralelo con demandas diferentes entonces se controla el caudal bien por tubos de diferente diámetro o bien por válvulas dosificadoras calibradas, figura 2.35. En la práctica esto significa que el accionamiento de un actuador no interfiere en el trabajo de los demás cuando se accionen de forma simultánea. Referencia Web [6].

http://www.editorialagricola.com/v_portal/informacion/informacionver.asp?cod=1604&t

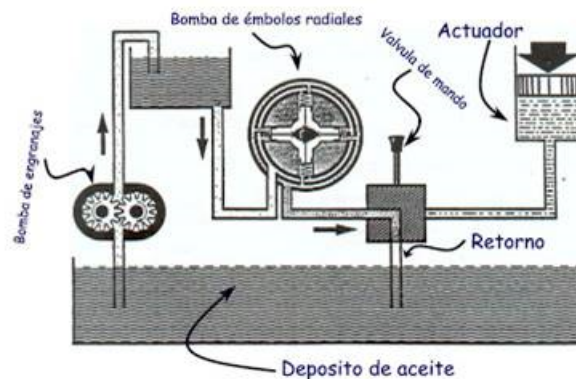


Figura 2.35: Sistema hidráulico centro cerrado (www.másquemáquinas.com,2013).

2.11.2. Actuadores

Los actuadores son dispositivos capaces de generar una fuerza a partir de líquidos, de energía eléctrica y gaseosa. El actuador recibe la orden de un regulador o controlador y da una salida necesaria para activar a un elemento final de control como lo son las válvulas. Estos actuadores se basan, para su funcionamiento, en la presión ejercida por un líquido, generalmente un tipo de aceite, figura 2.36. Las máquinas que normalmente se encuentran conformadas por actuadores hidráulicos tienen mayor velocidad y mayor resistencia mecánica y son de gran tamaño, por ello, son usados para aplicaciones donde requieran de

una carga pesada. De acuerdo con su función podemos clasificar a los cilindros hidráulicos en 2 tipos:

- De efecto simple: se utiliza fuerza hidráulica para empujar y una fuerza externa, diferente, para contraer.
- De acción doble: se emplea la fuerza hidráulica para efectuar ambas acciones.

Cilindro de efecto doble: La carga puede colocarse en cualquiera de los lados del cilindro. Se genera un impulso horizontal debido a la diferencia de presión entre los extremos del pistón cuando el líquido entra en este. Referencia Web [7]. <http://www.uhu.es/rafael.sanchez/ingenieriamaquinas/carpeta.html>.

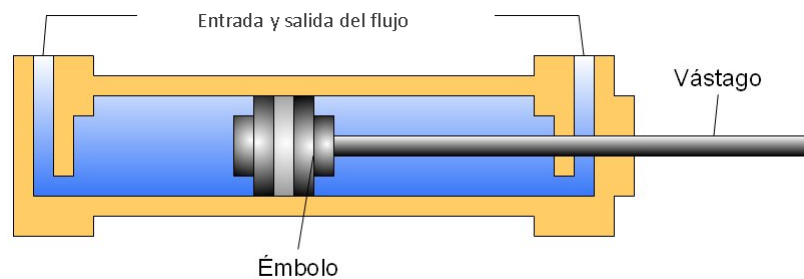


Figura 2.36: Actuador hidráulico de doble efecto (www.másquemáquinas.com,2013)

Válvulas proporcionales

Son válvulas que regulan la presión y el caudal de un sistema hidráulico por medio de señales recibidas de un controlador lógico programable, que puede ser de corriente o de voltaje, (figura 2.37). Su principal aplicación es el control de posición y de fuerza, ya que los movimientos son proporcionales y de precisión, lo que permite un manejo más exacto del paso de fluidos. Por medio de un dispositivo de procesamiento se puede ubicar un actuador en puntos muy precisos.

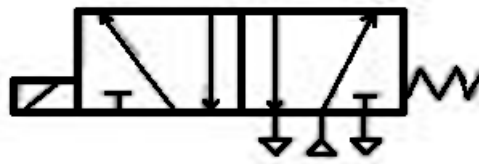


Figura 2.37: Válvulas proporcionales, “Conceptos básicos: Neumática e Hidráulica” (www.sapiensman.com/neumatica).

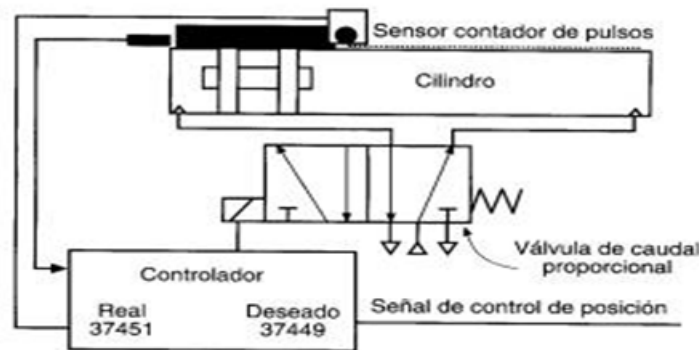


Figura 2.38: Control de lazo cerrado con válvulas proporcionales, “Conceptos básicos: Neumática e Hidráulica” (www.sapiensman.com/neumatica).

Por medio de una válvula proporcional podemos realizar un control de posición de lazo cerrado, donde el actuador podría ser un cilindro, el sensor un sistema óptico que envía pulsos de acuerdo a la posición de dicho cilindro, y el controlador un procesador que gobierne el dispositivo en general, figura 2.38. El número de impulsos se incrementa a medida que el pistón se desplaza a la derecha y disminuye cuando se mueve a la izquierda.

Válvulas direccionales

Las Válvulas direccionales accionadas por un solenoide o electroválvulas, funcionan al enviar un pulso eléctrico que hace reaccionar una bobina, lo que produce se mueva el núcleo o corredera. Los solenoides pueden funcionar con corriente alterna o con corriente (AC) directa (DC).

Electroválvulas de doble solenoide, figura 2.39. El funcionamiento de éstas consiste para que la válvula vaya de una posición a otra, basta con aplicar un pequeño pulso eléctrico a la bobina que está en la posición opuesta. Allí permanecerá sin importar que dicha bobina siga energizada y hasta que se aplique un pulso en la bobina contraria. La principal función en estos sistemas es la de “memorizar” una señal sin que el controlador este obligado a tener permanentemente energizada la bobina. Referencia Web [8].<http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica16.htm>



Figura 2.39: Electroválvula de doble solenoide (www.sapiensman.com).

2.11.3. Circuitos electrónicos

Dentro de los dispositivos electrónicos más empleados para regular la operación de mecanismos se encuentran los Controles Lógicos Programables (PLC) y los microcontroladores, los primeros construidos basándose en los segundos. Los PLCs han inundado la industria manufacturera y desempeñan un papel muy importante en la automatización de los procesos, pero también están siendo usados para controlar máquinas de CNC, aparatos electrónicos de línea blanca, etc., dando origen a dispositivos mecatrónicos.

Un PLC es un equipo electrónico programable que permite almacenar una secuencia de ordenes (programa) en su interior y ejecutarlo de forma cíclica con el fin de realizar una tarea. Un PLC trabaja en base a la información recibida por los captadores y el programa

lógico interno, actuando sobre los accionadores de la instalación. Los PLC actuales pueden comunicarse con otros controladores y computadoras en redes de área local, y son una parte fundamental de los modernos sistemas de control distribuido. Son diseñados para reducir el costo económico y el consumo de energía de un sistema en particular. Por eso el tamaño de la unidad central de procesamiento, la cantidad de memoria y los periféricos incluidos dependerán de la aplicación. El control de un electrodoméstico sencillo como una batidora, utilizará un procesador muy pequeño (4 u 8 bits) por que sustituirá a un autómata (que siempre está realizando un mismo proceso) finito. En cambio un reproductor de música y/o vídeo digital (mp3 o mp4) requerirá de un procesador de 32 bit o de 64 bit y de uno o más Códec de señal digital (audio y/o vídeo). El control de un sistema de frenos ABS (Antiblock Brake System) se basa normalmente en un microcontrolador de 16 bit, al igual que el sistema de control electrónico del motor en un automóvil. Referencia Web [9]. <http://www.tlalpan.uvmnet.edu/oiid/download/Microcontroladores%20y%20plc.pdf>

Capítulo III

MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente capítulo, se realizó una descripción general de las acciones del proyecto o procedimientos conducentes al objeto de investigación. Dado esto, ya que posteriormente en el capítulo IV de resultados, se presentan de manera específica las técnicas y procedimientos que se utilizaron en cada una de las actividades de investigación del proyecto, así como, los materiales, equipos y programas. **Es importante mencionar que la presentación del capítulo de Materiales y Métodos y de Resultados, obedecen al formato de tesis de presentación de resultados de investigación por ARTÍCULOS CIENTÍFICOS.**

Para llevar a cabo el desarrollo metodológico de este proyecto de investigación fue necesario el empleo de dos tecnologías asociadas; por una parte el uso de labranza vertical basado en los parámetros de la Teoría de la Profundidad Crítica y la segunda, la tecnología de Agricultura de Precisión. Cada tecnología de manera independiente, representaba una reducción significativa de energía en la aplicación de laboreo profundo variable. Así mismo, la integralidad tecnológica representaba también la oportunidad de **optimizar** dicha actividad de campo.

Con la finalidad de conducir una secuencia lógica y periódica de los objetivos, la metodología fue dividida en seis fases. En cada una de ellas se describe el propósito y las acciones realizadas, iniciando con la tecnología de labranza vertical, en donde se cuan-

tificaron los requerimientos de la resistencia específica del suelo de forma integral en 14 arreglos de cinceles, evaluando los cuatro parámetros más significativos en ahorro de requerimientos energéticos (profundidad de trabajo, posición y espaciamiento de cinceles, número de cuerpos y uso de alas) en la aplicación de labranza vertical. Posteriormente, en la fase II se realizó el diseño, construcción y evaluación de un prototipo articulado de arado de cinceles que permitiera la aplicación variable en forma automatizada de labranza profunda, en donde se evaluaron los arreglos de cinceles que presentaron los niveles más bajos en la demanda de energía en comparación con el sistema convencional de labranza primaria.

La Fase III y primera etapa de tecnología de agricultura de precisión fue para la generación de mapas diagnóstico del sitio. Se inició con el desarrollo de un carro portadores capaz de determinar en tiempo real la medición de parámetros físicos del suelo *in situ*, junto con un sistema portable GPS, el cual permitió la localización o georreferenciación, tal como la variable de resistencia a la penetración (capas compactadas del suelo) para posteriormente generar mapas de diagnóstico, los cuales, nos proporcionaron información por región categorizada o segmentada de todo el sitio (lectura de la medición y localización). Una vez generado el mapa de diagnóstico con la información de la medición y ubicación de capas compactadas del suelo del sitio específico, en la Fase IV se desarrolló el plan de trabajo o plan de acción para el correcto manejo del sitio (mapa de prescripción), capaz de ejecutar lo que necesita, como lo necesita, en el momento que lo necesita y en cualquier espacio de nuestro sitio en términos de aplicación de labranza.

Para la Fase V, de control o aplicación, ya se cuenta con los rangos definidos, en este caso particular: las profundidades de trabajo y las áreas o regiones ya determinados en la prescripción. A partir de este momento fue necesario establecer los parámetros de la comunicación entre el equipo de aplicación variable de labranza, el controlador FMX, la antena RTK y el programa de nivelación de campo, para poder aplicar en forma inteligente la prescripción deseada.

En la aplicación de esta nueva tecnología de labranza vertical inteligente Fase VI, ya se tienen integrados todos los componentes, se inicia la aplicación de prescripción o diseño de trabajo con el uso del punto maestro (MBP) o puntos auxiliares de trabajo (BM). Se menciona, que la aplicación de laboreo diferenciado “variable”, se realiza por franjas correspondientes al ancho de trabajo del implemento, dado que el programa utilizado solo ejecuta en franjas o líneas las acciones de nivelación para drenaje. La operación total del sistema la realiza el controlador FMX acorde a lo que nosotros deseamos en el sitio (prescripción), gobernando la válvula electrohidráulica proporcional y en consecuencia a la maniobrabilidad del prototipo.

3.1 Fase 1 (labranza vertical)

Propósito:

Determinación del o los arreglos de cinceles que presenten el menor valor de la resistencia específica del suelo (Nm^{-2}) en la aplicación de labranza primaria basada en la teoría de la profundidad crítica.

Acciones de proyecto:

Los experimentos se llevaron a cabo durante los años 2012 al 2014 en la estación del campo experimental “Rancho Navidad”, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicada al noroeste del estado de Coahuila, México. La ubicación del sitio es de $25^{\circ}01'50.88''\text{N}$ $100^{\circ}37'35.65''\text{W}$, con una altitud de 1884 msnm. El suelo utilizado fue un suelo franco arcillo arenoso con un 47,5 % de arena, 45 % limo y arcilla 6,8 %, el contenido de humedad gravimétrica del suelo media de cultivos fue del 12 %. El tamaño total de la parcela experimental fue de tres hectáreas divididas en 14 tratamientos, en un diseño en bloques al azar con ocho repeticiones de 100 metros de largo por 2 metros de ancho.

1. Desarrollo y acondicionamiento de cuatro transductores octagonales de anillo extendido, para el monitoreo de las fuerzas de reacción del suelo.

Se utilizaron dos tipos de transductores de fuerza, un tipo axial con capacidad de 60 kN, colocado entre los dos tractores (prueba actualmente normada), los tres transductores restantes fueron iguales y con una capacidad de 80 kN (**ver Anexo I** para el acondicionamiento de transductores octagonales). El maquinado de los sensores se elaboró en la empresa BYSON, TECNOMEC AGRICOLA S.A. DE C.V., ubicada en el municipio de Jesús María, Aguascalientes, México.

2. Acondicionamiento de un enganche rápido o estructura flotante, que permitió el acoplamiento de tres transductores posicionados entre el enganche del tercer punto del tractor y el implemento a evaluar. Este enganche contaba con extensiones de rotulas para el acoplamiento del implemento junto con los cinceles (mínimo tres y máximo seis) con espaciamentos máximos entre cuerpos de 0.60 m. Los parámetros de diseño fueron establecidos por BYSON, TECNOMEC AGRICOLA S.A. DE C.V.

3. Calibración de los transductores en laboratorio para determinar la confiabilidad de los sensores.

Para realizar este procedimiento (**ver Anexo II**) fue necesario uniformizar los parámetros del amplificador y ganancia en laboratorio en cada uno de los transductores. Se inicia con la conexión de los sensores al módulo con el ajuste de parámetros del amplificador y la computadora. El diseño estadístico de prueba bajo condiciones de laboratorio fue un bloque al azar con seis repeticiones para cada arreglo en la determinación de las constantes para cada sensor. Los parámetros utilizados fueron un arado articulado de cinceles tipo semi-recto, una carga concentrada de 347 kilogramos distribuidos en ocho pesos (48, 48, 48,73, 35, 35, 30 y 30 Kg), frecuencia de muestreo de 20 Hz con una total de 6800 datos por repetición.

4. Se evaluaron en campo 14 arreglos de cinceles con parámetros basados en la Teoría de la Profundidad Crítica, determinando los requerimientos de fuerza por área disturbada de suelo.

Para el registro de la información se utilizó un sistema de adquisición de datos Dak-booq 2000 de la marca IOTECH junto con un acondicionador de señal DBK-43A. Para el análisis de la información de la magnitud de fuerza registrada, se utilizó el método de análisis espectral (Campos y Wills, 1995). Para el análisis, así como para la interpretación de los resultados se utilizó el paquete estadístico de Minitab 15. El conjunto de 14 pruebas se llevaron a cabo con diferentes arreglos de arado de cincel con ocho repeticiones para cada prueba, para fines prácticos las pruebas fueron divididas en tres bloques (I, II y III), como se muestra en la Cuadro 3.1.

En el bloque (I), se analizaron los tratamientos de un arado de cincel con y sin alas, comparándolos con los tratamientos de dos cinceles frontales a dos profundidades, 0,20 y 0,30 m. En el bloque (II) se analizaron los tratamientos de tres cinceles; dos someros y a dos diferentes profundidades de 0,20 y 0,30 m combinados con un cincel trasero a 0,30 m de profundidad (con o sin alas). En el bloque (III) se compararon el desempeño de dos cinceles traseros con un espaciamiento de 1.20 m entre ellos y con las tres geometrías diferentes de alas. En cada tratamiento las variables medidas fueron: la fuerza de tiro total en kN, el área disturbada del suelo en m^2 y la resistencia específica del suelo en kNm^{-2} . Para la determinación de la sección transversal del suelo disturbado se utilizó un perfilómetro con una regla graduada a cada 0,10 m de ancho de trabajo.

Cuadro 3.1: Evaluaciones en bloques de arreglos de cincel bajo condiciones en campo.

Grupo	Tratamiento	Arreglos	Tamaño de alas (m)	Descripcion	
	1	1RCT-30	*	Un cincel sin alas	
	2	1RCT-SW-30	0.3	Un cincel con alas	
	3	1RCT-MW-30	0.45	Un cincel con alas	
	4	1RCT-LW-30	0.6	Un cincel con alas	
	5	2ST-20	*	Dos cinceles someros 0.20 m de profundidad	
I	6	2ST-30	*	Dos cinceles someros 0.30 m de profundidad	
	1	2ST20-1RCT30-CH	0.3	Dos someros + cincel alado a 0.30 m ACH	
	2	2ST20-1RCT30-MED	0.45	Dos someros + cincel alado a 0.30 mAMED	
	3	2ST20-1RCT30-GRD	0.6	Dos someros + cincel alado a 0.30 mAGRD	
	II	4	2ST20-1RCT30	*	Dos someros + cincel alado a 0.30 m SA
	5	2ST30-1RCT30	*	Dos someros a 0.30 m + cincel profundo	
	1	2RCT30-ACH	0.3	Dos cinceles profundos ACH a 1.20 m de espaciamiento	
	2	2RCT30-AMED	0.45	Dos cinceles profundos AMED a 1.20 m de espaciamiento	
III	3	2RCT30-AGRD	0.6	Dos cinceles profundos AGDE a 1.20 m de espaciamiento	

* Cinceles sin alas. Nota: La profundidad de los cinceles traseros se mantuvo constante a 0.30 m. ACH: Ala chica con ancho de 0.30 m, AMED: Ala mediana con ancho de 0.45 m, AGDE: Ala grande con ancho de 0.60 m.

3.2 Fase 2 (labranza vertical)

Propósito:

Diseño, construcción y evaluación de un prototipo articulado de arado de cinceles que permita la aplicación inteligente de laboreo profundo variable.

Acciones de proyecto:

1. Diseño y construcción de un prototipo articulado de arado de cinceles que permita el acoplamiento de cuerpos de cinceles (mínimo de tres cuerpos de cincel y máximo seis).

Que disponga de dos plataformas, una frontal o fija para dos o cuatro cinceles someros y otra trasera o móvil para uno o dos cinceles profundos. La plataforma trasera, deberá moverse utilizando actuadores que permitan el desplazamiento hacia abajo y hacia arriba en forma automática a partir de una posición de referencia y en respuesta de una señal emitida por un controlador hacia un dispositivo electrohidráulico de control, para la aplicación de labranza profunda variable.

Cuadro 3.2: Parámetros de diseño

Parámetros técnicos de diseño del prototipo articulado de arado de cinceles	
Ancho de trabajo	2.40 m
Dos secciones	Sección frontal fija para cuatro cuerpos de cinceles someros (única profundidad de 0.20 m) Sección articulada para dos cuerpos de cinceles profundos (0.20 m , 0.30 m y 0.40 m)
Nº de cuerpos	Arreglo 1 (dos cinceles someros y un cincel profundo) Arreglo 2 (cuatro cinceles someros y dos cinceles profundos)
Espaciamiento mínimo entre cinceles	0.30 m
Espaciamiento máximo entre cinceles	0.60 m
Espaciamiento entre secciones	0.60 m
Forma de cincel	semirrectos
Dimensiones de la punta	0.0508 m (2")
Profundidad máxima de trabajo	0.40 m
Actuadores hidráulicos	2
Electroválvula proporcional	Marca Danfoss

3.3 Fase 3 (agricultura de precisión)

Propósito:

Desarrollo de un carro porta-sensores para la medición geo-referenciada de parámetros físicos del suelo en tiempo real y que dicha información permita a través de un SIG la generación de mapas de diagnóstico.

Acciones de proyecto:

1. Desarrollar dos sensores, para la medición de resistencia a la penetración y profundidad de las capas duras del suelo, respectivamente.

Los parámetros de diseño para el transductor y sonda de cono fueron de una capacidad de 10kN para un rango de medición hasta de 9 Mpa, este sensor está integrado por un transductor de fuerzas tipo anillo y una herramienta de cono. Para las consideraciones del diseño del sensor de anillo se empleó el método desarrollado por

Campos (1993). Para la punta cónica con área de 0.00105453 m se utilizó la normalizada por la Asociación Americana de Ingenieros Agrónomos (ASABE, 2002). Las galgas extensiométricas montadas en el anillo fueron de 350 Ohm de la empresa Kyowa, empleando para su montaje el procedimiento descrito por Sakurai (1996). Para la localización de la profundidad de las capas duras del suelo, fue necesario el acondicionamiento de un sensor de proximidad, el cual proporciona lecturas muy precisas en un rango de 0 a 600 mm y está integrado por un sensor ultrasónico LV-MaxSonar-EZ1, amplificadores de instrumentación en serie AD620AN y filtro pasa-baja RC. Esta combinación proporciona tener mediciones con bajo porcentaje de ruido al momento del registro en el sistema de adquisición. Este sensor se alimenta con voltajes entre 2.5 y 5 VDC.

2. Evaluación de los sensores bajo condiciones de laboratorio para obtener las ecuaciones de respuesta y su confiabilidad.

Para la evaluación en campo, se requiere previamente calibrar los sensores bajo condiciones de laboratorio. Para el sensor de anillo, es necesario que se cargue y descargue un peso conocido y generar la ecuación de respuesta en voltaje. Se instaló el amplificador DaqBook/2000 y se activó el programa Daqview 9.1.27 para el registro de la información. Una vez cubierto el paso anterior, se tiene que ajustar los parámetros de ganancia del amplificador e iniciar con la calibración. El registro de los datos fue de 6000 datos a una frecuencia de 20 Hz. Posteriormente se grafican los datos en Excel y se obtienen los valores promedio de la deformación y se genera la ecuación de respuesta.

3. Evaluar los sensores bajo condiciones de campo para la medición de resistencia a la penetración desde la superficie de suelo hasta 0.40 m de profundidad.

Las evaluaciones se realizaron en el Rancho Navidad, con las características del suelo y ubicación ya descritas con anterioridad. La humedad promedio tuvo registro de 15% y densidad aparente de 1.07 grcm⁻³. El tamaño de la parcela de prueba fue de 1 ha, con un total de 30 puntos de muestreo. Después de realizar el muestreo en campo, se procesa la información para obtener las lecturas y utilizar la ecuación de

respuesta. Para la obtención de valores de resistencia a la penetración a profundidades de (0.10-0.20),(0.20-0.30) y (0.30-0.40) m , se utilizan los datos obtenidos con el sensor de profundidad. Para cada una de las profundidades señaladas se realizó un mapa de diagnóstico con el programa GS+V9 (**ver Anexo III**), utilizando el método de interpolación IDW (Inverse Distance Weighting). Para el análisis de la variabilidad se determinó la media, mediana, el valor máximo y mínimo y el coeficiente de variación (CV). En cuanto al análisis de CV se tomó el criterio de Warrick y Nielsen (1980), que considera la siguiente clasificación de la variabilidad: baja para CV menores de 12 %, media entre 12 y 60 % y alta para CV mayores a 60 %.

3.4 Fase 4 (agricultura de precisión)

Propósito:

Elaborar una metodología para la implementación de un sistema de control inteligente para la aplicación variable de labranza vertical profunda a través de la generación de mapas de prescripción y su conectividad con el controlador FMX.

Acciones de proyecto:

1. Familiarizarse con el uso y las facilidades del controlador FMX y el programa Field Level II. Para esta actividad se requiere configurar el sistema de control automatizado de profundidad variable basado en el programa de nivelación Field Level II y la integración de componentes como: controlador FMX, estación base RTK, receptor GPS, sistema electrohidráulico proporcional (válvula proporcional y actuadores), sensor de posición y el implemento. El procedimiento se describe en (**Anexo IV**).
2. Evaluar en forma estática el sistema de control inteligente de profundidad y cuantificar las variables: desplazamiento, tiempo de respuesta del sistema y error en una prescripción de (0.10 y 0.20 m por debajo y por encima de un plano de referencia

o nivelación). Para el desarrollo de esta evaluación se utilizó el prototipo articulado de arado de cinceles con el tractor ajustado a 1800 rpm como fuente de poder, pero sin movimiento. Se conectó el puerto de comunicación entre el controlador FMX y la válvula proporcional. Se nivelaron los marcos frontal (fijo) y posterior (móvil) del prototipo. Se acoplo el sensor sonar de profundidad en el marco frontal y la base reflectora se posicionó en la parte móvil, dicho sensor de proximidad usado para la medición del desplazamiento de la parte móvil con respecto a la fija, permitiendo registrar los cambios de altura en tiempo real. Se ajustaron los datos de prueba en el Daqbook a una frecuencia de registro de 20 datos por segundo para el registro de la información. Los tratamientos evaluados fueron instrucciones de cambio de distancia de la función de grosero de 0.10 y 0.20 m hacia arriba y hacia abajo y ajustados y programados a través de la pantalla y su aplicación Field Level II, dando un total de cuatro tratamientos, seleccionados en base a los rangos utilizados en labranza profunda y simulando los posibles cambios de profundidad variable que van de : labranza de 0.20 a 0.30m , de 0.30 a 0.40 o labranza de 0.20 a 0.40 m en ambos sentidos de dirección al momento de realizar dicha operación en campo. Las variables de respuesta a medir del sistema de control fueron: distancia total recorrida (mm), distancia por pulsos (mms-1), retardo entre pulsos (s) y error (mm).

3. Generar mapas de alturas, cortes y relleno para la obtención de información del sitio a través del levantamiento topográfico del programa Survey.
4. Procesar y extraer datos para la generación del diseño de prescripción del sitio en la facilidad Field level II.
5. Generar y cargar mapa de prescripción al controlador FMX y establecer conectividad.
6. Evaluar en campo la respuesta del sistema de control inteligente para la aplicación variable de labranza vertical profunda del suelo.

Para las acciones de proyecto 3, 4 y 5, se inicia con la descripción del sistema de control el cual está integrado por los siguientes componentes: Pantalla FMX, antena de corrección RTK, válvula electrohidráulica proporcional y actuadores hidráulicos y un datalogger tipo logbook para el registro de los datos del sensor y sus posiciones georreferenciadas. A la pantalla se le conecta una antena de recepción de señal RTK con precisión menor a 2.54 cm, una antena de recepción satelital (GPS), un módulo de control electrohidráulico. En este trabajo se utilizaron dos aplicaciones utilizadas en la nivelación de suelos; Survey y Field Level II para realizar el levantamiento topográfico y el control variable de la profundidad de la sección trasera respectivamente. La estación base RTK se instaló a 500 m del sitio de prueba a cielo abierto, a una frecuencia de 450 MHz, radio de cobertura hasta de 3 km y mensajes de corrección al receptor GPS hasta de cinco veces por segundo. La fase de evaluación inicia con la determinación del tamaño de la muestra, la magnitud de la fuerza de resistencia a la penetración registrada y de su georreferenciación. Continúa con el trazado de la parcela y el levantamiento topográfico en la superficie o sitio de trabajo, definiendo un punto maestro (BMP), realizando el límite interior y exterior. Una vez realizado esto se genera en forma automática en la pantalla el mapa de alturas relativas y el mapa de cortes y rellenos. Para el análisis de la base de datos es necesario realizar un proceso de cambio de coordenadas de decimales a coordenadas relativas e iniciar la edición de la prescripción y luego la compilación de la base de datos, generación de nuevas alturas con la localización de las capas duras del suelo y la configuración del nuevo plano del diseño basado en puntos de control y en la pendiente natural del terreno. Finalmente se edita el plano del nuevo diseño y se carga en el controlador. Para configuración de antena ver (**Anexo V**).

3.5 Fase 5 (labranza vertical)

Propósito:

Evaluar el sistema de monitoreo integral bajo condiciones en campo

Acciones de proyecto:

1. Evaluar el sistema de monitoreo integral bajo condiciones en campo de los arreglos que presentaron los menores requerimientos de resistencia específica del suelo en tres diferentes profundidades de trabajo (0.20, 0.30 y 0.40 m) y compararlos con la referencia del sistema tradicional. Para el desarrollo de la evaluación en campo se utilizó una parcela de 1.5 hectáreas, se trazaron 15 puntos en tres franjas con 2.40 m, correspondiente al ancho de trabajo del implemento, para esta etapa se debe contar con la integración de los componentes del sistema de control. El registro de datos con el Logbook fue a una frecuencia de 20 datos por segundo y con una velocidad del tractor de 5 kmh-1.
2. Determinar el consumo de energía por unidad de superficie (MJha-1) en la aplicación variable de labranza vertical profunda. Para la determinación del consumo total de energía fue utilizado el método del área bajo la curva en el programa de Matlab versión 1.2 descrito por (Pérez, 2002), para el diseño fue utilizado un bloques completamente al azar con tres repeticiones evaluado en el programa estadístico Minitab V15. El cálculo de esta variable fue analizando la fuerza obtenida directamente de los transductores y el área seccional de área disturbada ocasionada por la herramienta y extrapolada a una hectárea.

3.6 Fase 6 (labranza vertical y agricultura de precisión)

Propósito:

Aplicación integral de la tecnología de labranza inteligente.

Acciones de proyecto:

1. Evaluar en campo la aplicación variable de labranza vertical utilizando el prototipo articulado de arado de cinceles y el sistema de control inteligente en forma integral, utilizando el arreglo de tres cinceles con alas de 0.60 m y a tres diferentes profundidades de trabajo (0.20, 0.30 y 0.40 m) en forma aleatorizada y basados en un mapa de prescripción. El diseño utilizado fue un bloque completamente al azar con tres repeticiones por tratamiento. El tamaño de la parcela fue de 100 m por el ancho de trabajo del implemento 2.40 m.
2. Verificar en campo la profundidad de trabajo realizada por el implemento de acuerdo a la prescripción establecida y al registro de datos del sensor de profundidad. Esta evaluación se llevara a cabo únicamente sacando la tierra del área de trabajo y midiendo con una regla graduada la profundidad de trabajo.

Capítulo IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo, se muestran los resultados obtenidos en cada una de las seis fases metodológicas. La forma de presentación de resultados es iniciando con un breve resumen de los productos de la investigación por fase y posteriormente dándole una gran relevancia al conocimiento generado: **en el formato de artículo científico**. Es importante mencionar que toda la información general del proyecto está depositada en 15 citas anexas y correspondientes a 3 tesis de maestría y 12 de licenciatura que se circunscriben al objetivo general de este proyecto de investigación.

4.1 Productos de la Fase I (Labranza Vertical)

Se desarrollaron y acondicionaron (Ver Anexo I) cinco transductores octagonales de anillo extendido (Figura 4.1 a y b) con capacidad individual de monitoreo hasta de 80 kN. Estos sensores se utilizaron para las mediciones bajo condiciones de laboratorio y campo de las fuerzas de reacción del suelo en las direcciones (X, Y y Momentos).

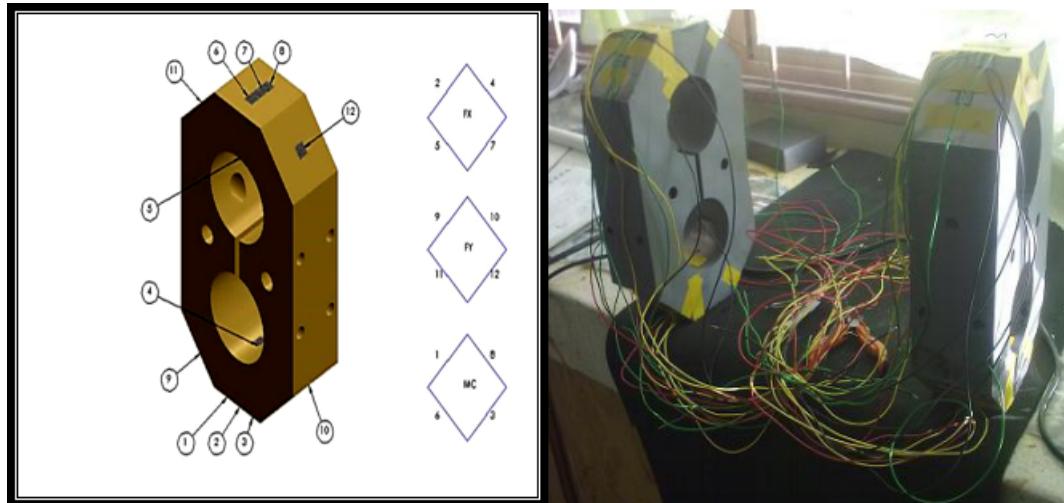


Figura 4.1: a) Diseño de EOR b) construcción y acondicionamiento de EOR.

4.1.2 Se acondicionó un marco o estructura flotante integral (Figura 4.2 a y b) posicionada entre el enganche del tercer punto del tractor y el implemento a evaluar. Dicha estructura, permite el acoplamiento directo de tres transductores en los tres puntos de enganche del tractor y se utiliza para la calibración en laboratorio y su evaluación en campo del monitoreo de las fuerzas de reacción del suelo. Los dos transductores restantes se acoplan directamente en la herramienta como medio de comparación del sistema integral.

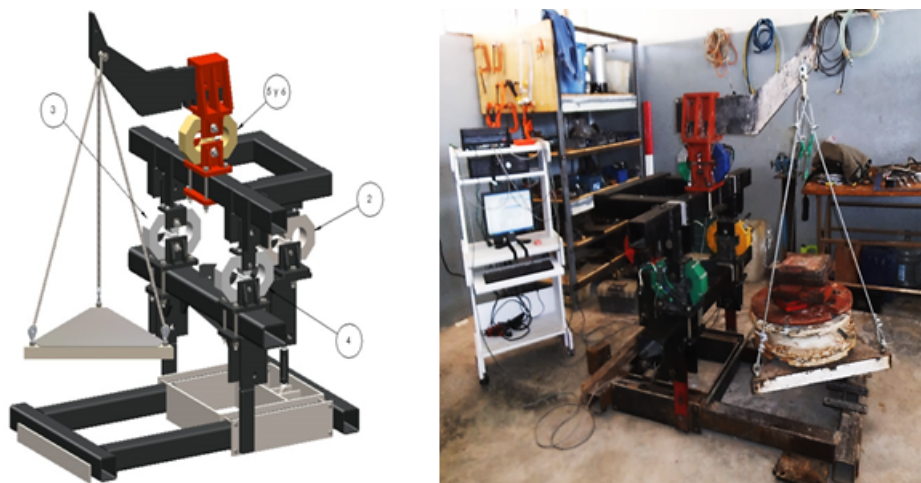


Figura 4.2: a) Diseño del marco integral b) calibración en laboratorio.

4.1.3 Los transductores empleados para las mediciones de las fuerzas en el sistema integral y en el implemento, mostraron en laboratorio una correlación superior al 99%,

(Figura 4.3 a y b) representando una alta confiabilidad en el funcionamiento de los sensores.

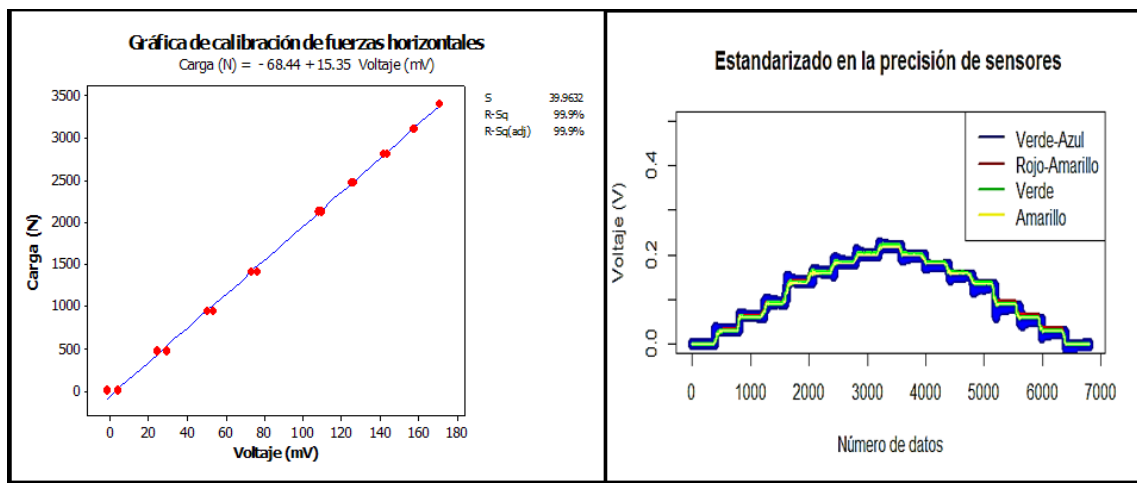


Figura 4.3: a) Calibración de EOR b) estandarizado de EOR.

4.1.4 Evaluación de Sistema integral de monitoreo bajo condiciones de campo (Figura 4.4 a y b), en 14 arreglos de cinceles bajo parámetros de la teoría de la profundidad crítica.



Figura 4.4: a y b Evaluación de Sistema integral de monitoreo en campo.

4.1.5 En la primera fase se generaron:

Dos tesis de licenciatura in tituladas

Bonifaz del Carpio, A. 2012. Evaluación de un transductor integral para determinar la magnitud de las fuerzas que actúan en los implementos de labranza. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Participación: generación de la información en trabajo de campo

Pérez-Martínez, P.2013. Labranza vertical empleando la teoría de profundidad crítica. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Participación:(Director externo de tesis)

Una tesis de maestría in titulada (Director externo de tesis)

Pacheco-López, J.L., 2012. Requerimientos de energía en la labranza vertical basado en el principio de profundidad crítica. Tesis de maestria.Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Participación:(Director externo de tesis)

Un artículo científico indexado en la Revista Internacional Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin American (AMA).

Pacheco-López, J.L.; S.G. Campos-Magaña; M. Cadena-Zapata; M.A. Reynolds-Chávez; G. Ramírez-Fuentes; J.R.Valenzuela-García. 2012. An experimental determination of the specific soil resistance of a sandy loam soil using vertical soil tillage in the northeast of México. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin American.

Participación: Co-autor

Estatus: (Aceptado para publicación)

4.1.1. ARTICULO CIENTÍFICO I- *An experimental determination of the specific soil resistance of a sandy loam soil using vertical soil tillage in the northeast of México. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin American.*

**AN EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE SPECIFIC SOIL
RESISTANCE OF A SANDY LOAM SOIL USING VERTICAL SOIL TILLAGE
IN THE NORTHEAST OF MEXICO.**

By:

Campos-Magaña S.G. Professor
Cadena-Zapata M. Professor

Ramirez-Fuentes G. Professor

Pacheco-Lopez J.L. Post-graduate Student
**Reynolds-Chávez M.A. Post-graduate
student**

Valezuela-Garcia J.R. Professor

Department of Agricultural Machinery
Universidad Autónoma Agraria Antonio
Narro. Coahuila, Mexico.

ABSTRACT

It was carried out an investigation to determine the specific soil resistance using a chisel plough prototype for vertical soil tillage in the semi-arid region of the northeast of Mexico. For this a combination of an axial transducer and an integral soil force dynamometer were used with a capacity of 60 and 80 kN of draft force, respectively. The equipment for force measurement was developed and calibrated in the facilities of the Department of Agricultural Engineering of the Agrarian Autonomous University Antonio Narro, Mexico. 14 arrangements of chisels plough were evaluated and divided into three blocks, for vertical tillage, with and without expanding wings to two different working depths. In the arrangements of the first block of tests, it was compared the performance of a chisel with three sizes of wings against two chisels to a depth of 0.20 m, the results show that there were not significant differences in the specific resistance of the soil, with an average of 83 kNm⁻². In this first block of evaluations a reduction of specific resistance

of 30% was obtained, with the use of a chisel with any size of wings in comparison with a chisel without wings to a depth of 0.30 m (from 121 to 82 kNm⁻²). In the second block of tests the arrangement of two leading chisels to 0.20 m working depth with a rear chisel to 0.30 at 0.45 m with 0.45m width size wing in comparison with two leading chisels to 0.20 m and a chisel without wings shown a significant difference in the specific resistance from 73 to 84 kNm⁻² respectively. In the third block; two rear tines with wings to 1.20 m of spacing were evaluated, the smallest specific soil resistance was obtained with the use of 0.60m width size wings in comparison with the other wing geometries, with values from 84 and 100 kNm⁻² respectively.

INTRODUCTION

In the production of extensive grain crops the soil preparation is the agricultural practice that represents the highest unitary costs on farm production and the one that consumes the biggest amount of fossil fuel. At the present time due to the increasing cost of fossil fuels, the reduction of the prices of the agricultural commodities and environmental pollution, have been required a progressive reduction of production cost and to search technological alternative solutions that substitute the traditional agricultural production systems. According to different carried out studies, with the appropriate agricultural productions systems a decrease of until 30% can be obtained in the fuel consumption (IDAE, 2006).

Nowadays, due to the excessive and inadequate use of the tillage implements, soil degradation is caused and it generates the drop profitability of the farm crops; searching for solutions to this problem has led to the study and installation of farm tillage conservation systems, including soil vertical tillage, with the purpose of diminishing the impact on the environment and especially on the soil. For the above-mentioned it is important to know different operative parameters of tillage implements and their effect in the soil (Camacho and Rodriguez, 2007).

It is convenient to point out that the vertical tillage is a technology that promotes the saving of energy demand on farm production costs and improves the physical properties of the soil in comparison with the use of other traditional primary tillage. The vertical tillage is a new cultivation practice in the world which tends to replace the traditional systems such as moldboard or disks plough. It has been demonstrated that the agricultural production systems based on the use of chisel plow require up to 40 percent less energy and working time than the traditional systems, without reducing the grain yields (Michel *et al.*, 1985).

McKyes (1985) describes that a critical working depth is reached with chisel ploughs, in which lateral removal of soil is avoided, and that depends on the working width and tine rake angle, as well as density and moisture content of soil. To work deeper of critical depths, it is advisable the use of lateral wings coupled to the chisels tip, which reduces specific soil resistance and increase the working width and field efficiency.

Cisneros *et al.*, (1998), after four years of tests, evaluate the effect of winged chisel tines on the specific soil resistance, bulk density and determined a significant reduction of those parameters in depths shallower than 0.25 m in comparison with treatments of direct seeding. After thirty months of experimental soil loosening test conducted by Di Prinzio *et al.*, (1999), which consisted of combining a subsoiler with wings together with two shallow leading tines compared with a traditional chisel plough, they found a significant reduction of soil density.

On the other hand, Di Prinzio *et al.*, (2001), comparing the use of a winged subsoiler against a normal subsoiler, found a significant difference of 17.4% on the reduction of soil density, similar results were found by Spoor and Godwin (1978), comparing the use of two geometries of wings compared with a conventional subsoiler without them.

The purpose of the present work was to evaluate and to determine the energy requirements of vertical tillage, by means of the application of the principle of critical depth and the use of an integral transducer for measurement draft force, applied to different arrangements of chisels (working depth and number of tines) plough with and without wings and also determine the magnitude of disturbed cross section and specific soil resistance.

MATERIALS AND METHODS

The experiments were carried out during the years 2010 to the 2012 in the experimental field station, "Rancho Navidad", of the Agrarian Autonomous University Antonio Narro, located to the northwest of the state of Coahuila, Mexico. The location of the site is $25^{\circ}01'50.88''\text{N}$ and $100^{\circ}37'35.65''\text{W}$, with an altitude of 1884 MASL. The soil is a sandy clay loam with 47.5% sand, 45% silt and 6.8 clay%, the average soil gravimetric moisture content for cultivations was 12%. The total size of the experimental test plot was three hectares divided into 14 treatments with eight replicates of 100 meters long by 2 meters width. For the statistical analyses a design of totally randomize blocks was used.

For recording the resistance forces of the soil during the field work, two force transducers were used, an axial type with capacity of 60 kN, placed between the two tractors. The other transducer was an integral type with capacity of 80 kN (**Figure 1**), and placed between the tractor and implement (**Figure 2**).



Figure 1. Integral force transducer employed during field evaluation of a prototype for vertical tillage.



Figure 2 Apparatus set for field evaluation, showing the integral force transducer.

For the registration of information a IOTECH brand system of data acquisition 200 was used together with a signal conditioner DBK-43A. For the analysis of information of the recorded magnitude forces the method of spectral analysis (Campos and Wills, 1995) was applied. For the analysis as well as for the interpretation of the results the statistical package of Minitab 15 was used.

To determine the magnitude of energy employed in the vertical tillage a set of 14 different tests were carried out with different chisel plough arrangements, eight replicates for each test were performed, for practical purpose the tests were divided into three blocks (I, II and III), as shown in **Table 1**.

Table 1 Evaluated set of blocks Arrangement of chisel tines under field conditions.

Group	Treatments	Arrangements	Wing's Size (m)	Description
I	1	1RCT-30	*	Chisel tine without wings
	2	1RCT-SW-30	0.30	Winged chisel tine
	3	1RCT-MW-30	0.45	Winged chisel tine
	4	1RCT-LW-30	0.60	Winged chisel tine
	5	2ST-20	*	Two shallow tine at 0.20 m depth
	6	2ST-30	*	Two shallow tine at 0.30 m depth
II	1	2ST20-1RCT30-SW	0.30	Two shallow tine at 0.20 m with rear chisel
	2	2ST20-1RCT30-MW	0.45	Two shallow tine at 0.20 m with rear chisel
	3	2ST20-1RCT30-LW	0.60	Two shallow tine at 0.20 m with rear chisel
	4	2ST20-1RCT30	*	Two shallow tine at 0.20 m with rear chisel
	5	2ST30-1RCT30	*	Two shallow tine at 0.30 m with rear chisel
III	1	2RCT30-SW	0.30	Two rear chisel at 1.20 m spacing
	2	2RCT30-MW	0.45	Two rear chisel at 1.20 m spacing
	3	2RCT30-LW	0.60	Two rear chisel at 1.20 m spacing

*** Chisel tines without wings. Note: The depth of rear chisel tine remains constant at a depth of 0.30 m.**

In the block (I), treatments of a chisel plough were analyzed with and without wings, comparing them with the treatments of two individual frontals chisel at two depths, 0.20 and 0.30 m. In the block (II) treatments of three tines were analyzed; two leading ones to different depths of 0.20 and 0.30 m combined with a rear tine to 0.30 m depth (with or without wings). In the block (III) were compared the performance of two rear tines with a spacing set to 1.20 m among them with the three different geometries of wings.

In each treatment the measured variables were: the total draft force in kN, the soil disturbed area in m² and the specific soil resistance in kNm⁻². To determine the disturbed

soil cross section a profile meter with a graduate rule was used to measure the depth each 0.10 m of the working width.

RESULTS AND DISCUSSION

The **Figure 3** shows the apparatus employed under field conditions, at “rancho Navidad” at Coahuila State of Mexico.



Figure 3 An example of the experimental equipment working during field evaluation In Table 2 it can be observed that with the use of a single tine plough, without wings, the specific soil resistance is significantly higher by 121.1 kNm^{-2} in comparison with the resistance for a chisel tine with any geometry of wings, which had a mean value of 83.5 kNm^{-2} . The highest demand of draft force was produced by the increase of working depth combined with the use of different wing's widths, however this promotes a bigger soil disturbaci3n area and a consequence brings a reduction of the specific soil resistance.

Table 2 Test results of the first block of experiments (I)

Chisel tine position	Wing's Size (m)	Chisel tines draft force (kN)	Soil disturbance area (m ²)	Proportion (%)	Specific soil resistance (kN/m ²)	Proportion (%)
⁽¹⁾ Rear chisel tine	*	14.9 b	0.126 d	54.5	121.1 a	100.0
Winged chisel tine	0.30	11.8 d	0.139 c d	60.2	86.6 b	75.6
Winged chisel tine	0.45 (ACH)	12.7 c d	0.158 b c	68.4	81.7 b	67.5
Winged chisel tine	0.60 (AG)	13.6 c	0.171 b	74.0	82.4 b	68.0
Two shallow tine to 0.20 m deep	*	13.5 c	0.157 b c	67.9	86.9 b	71.8
Two shallow tine to 0.30 m deep	*	18.371 a	0.231 a	100.0	80.1 b	66.1

* Chisel tines without wings. Note: The rear chisel tine remains at constant depth of 0.30 m. † Treatments not followed by the same letter are significantly different at a confidence level equivalent to 95%.

A considerably reduction of specific soil resistance was obtained with the use of wings attached to a chisel tine tip compared with the use of a wingless chisel tine working both tines at a depth of 0.30 m. Similar results on the reduction of the specific soil resistance were obtained by Spoor and Godwin (1978), when they compared the use of a chisel tine with two different geometries of wings (0.30 and 0.42 m respectively) with a conventional subsoiler working at the same depth, and also founded no significant difference in this parameter with the use of the two wing widths.

Figure 4 shows the effect on disturbed soil area with the used of different experimental arrangements, there can be appreciated that the best performance was obtained with two leading chisels tines working to a 0.30 m depth with a 0.231 m² followed by single tine with different wing sizes and then by a single chisel without wings. Similar results were found by Camacho and Magalhaes (2004) where they show the effect

of the use of winged subsoiler, compared to traditional chisel plough, for vertical tillage in the increment of soil disturbed area and the reduction of the specific soil resistance.

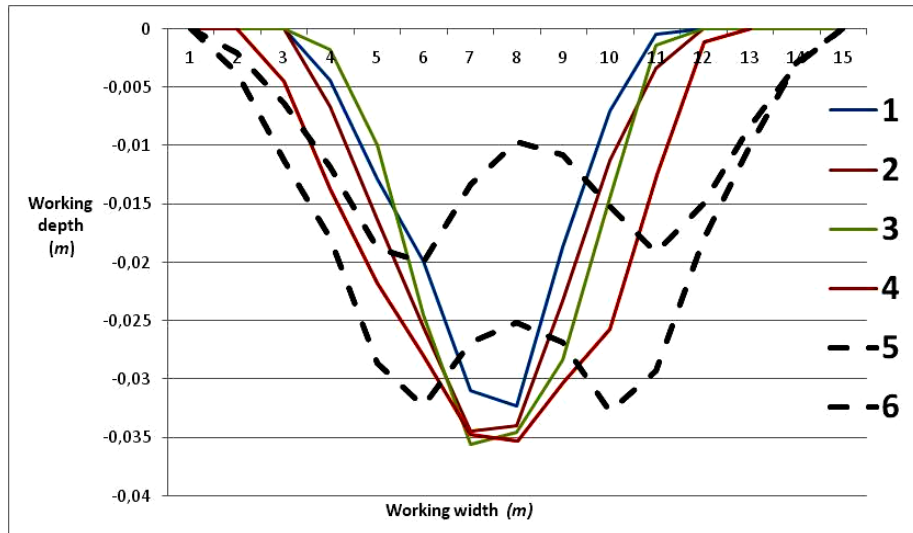


Figure 4 Soil disturbed area with five different treatments.

The **Table (3)** shows the results when the apparatus was set with three tines with different arrangements. There can be appreciated that the highest draft force demand was produced with three chisel tines without wing working all at 0.30 m depth, followed by the arrangement of two front shallow tines at 0.20m and a rear chisel tine with wings at 0.30 m depth. As well can be appreciated that the specific soil resistance doesn't show significant difference regarding the increment of size of wings with a mean of specific soil resistance of 76 kNm^{-2} .

Table 3 Test results of the second block (II) of tests.

Shallow tines position		Width size of wings (m)	Total draft force (kN)	Soil disturbed cross section (m ²)	Proportion (%)	Specific soil resistance (kN/m ²)	Proportion (%)
Spacing (m)	Depth (m)						
0.60	0.20	0.30	20.073 c	0.269 b	82	75.174 b c	89
0.60	0.20	0.45	21.03 b c	0.286 b	87	73.430 b c	87
0.60	0.20	0.60	22.204 a b	0.276 b	84	80.501 a b	95
0.60	0.20	*	17.422 d	0.208 c	64	84.341 a	100
0.60	0.30	*	23.129 a	0.327 a	100	70.772 c	84

* **Wingless Chisel tines** † Treatments not followed by the same letter are significantly different at a confidence level equivalent to 95%.

Also On **Table 3** are shown the results when the arrangement of two leading chisels tines working at 0.20 m and a rear chisel tine with 0.45 width size wings to a depth 0.30 m compared with the arrangement of two frontal chisels at 0.20 m and a rear chisel at 0.30 m without wings, showing a significant difference in the specific soil resistance from 73 to 84 kNm⁻² respectively, which represents a reduction of 13% between treatments. Di Prinzio *et al.*, (2001), found a similar result with a significant difference of 17.4% in the specific soil resistance when compared the use of a subsoiler with and without wings.

The **Figure (5)** allows a comparison of cross section areas of the five tests carried out in the block of experiments (II), where clearly can appreciate that the test four, with the arrangement of two leading rigid tines at a depth of 0.20 m and a rear chisel at 0.30 m with 0.45m wings, shows the better performance in term of specific soil resistance.

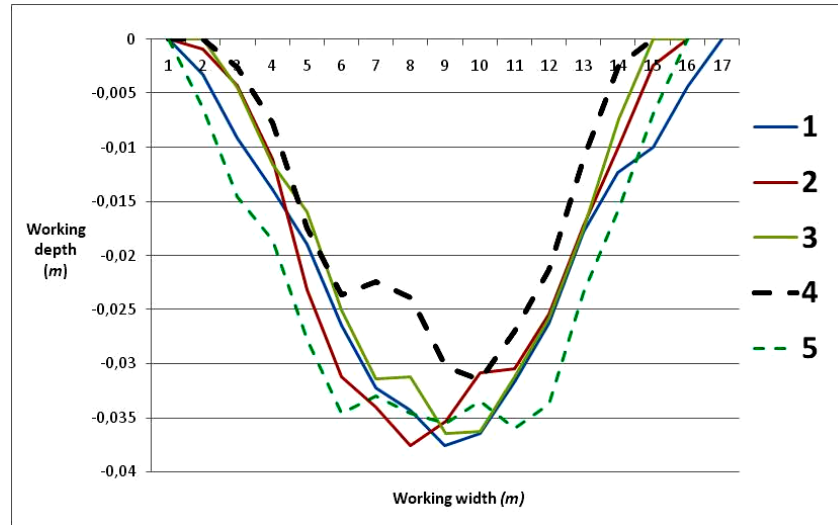


Figure 5 Soil disturbance comparisons with second block test

In the **Table 4** are shown the test results carried out with two rigid tines working to a depth of 0.30 m and with a working spacing of 1.20 m, observing that the demanded draft forces are statistically different for the three evaluated wing size. In relation to the soil disturbance there was no statistically difference when using 0.30m and 0.45m wings and, nevertheless there was a difference in the specific soil resistance from 81 to 95 kNm^{-2} between tines with different wing sizes.

Table 4 Test results of the third block (III) showing specific soil resistance with different winged tine geometries.

Rear chisel tine position		Width size wings (m)	Total force (kN)	Soil disturbance (m^2)	Proportion (%)	Specific resistance (kN/m^2)	Proportion (%)
Spacing (m)	Depth (m)						
1.20	0.30	0.30	30.007 c	0.315 b	73	95.5 a	100
1.20	0.30	0.45	31.5 b	0.331 b	76	95.7 a	100
1.20	0.30	0.60	34.9 a	0.434 a	100	80.67 b	84

† Treatments not followed by the same letter are significantly different at a confidence level equivalent to 95%.

CONCLUSIONS

The arrangement of a single chisel with three different sizes of wings, working at 0.30m depth, against two front chisels to 0.20 m didn't shown significant differences in the specific soil resistance with a mean value of 83 kNm^{-2} . A reduction of 30% in the soil specific resistance was obtained with the use of any winged chisel in comparison with a traditional chisel tine working all the arrangements at a 0.30 m depth.

On the second block of tests, the arrangement with two front chisels working at 0.20 m together with a rear chisel with 0.45m wings at 0.30 m, the results shows a reduction on the magnitude of specific soil resistance of 13%, in comparison of the use of two leading chisels at 0.20 m depth and a rear chisel without wings at 0.30m.

On the third block of tests with two chisels with wings to 1.20 m of spacing, the specific resistance that contributes significantly to the reduction of the specific soil resistance is with the use of 0.60m wing in comparison with the other wings with values from 84 and 100 kNm^{-2} respectively.

REFERENCES

- Camacho H. Jesús y. Magalhães S. G Paulo. 2004. Estudio de parámetros operacionales de discos dobles y cinceles parabólicos para prácticas culturales en áreas con residuos vegetales. *Agricultura Técnica (chile)* 64(1):58-65
- Camacho-Tamayo, J. H. y G. A. Rodríguez. 2007. Evaluación de implementos de labranza a diferentes velocidades de operación y contenidos de agua del suelo. *Agricultura Técnica* 67(1): 60-67.
- Campos-Magaña, .S.G. and Wills, B.M.D. 1995. Force Measurement-recording and data analysis system for tillage tolls. *Agricultural mechanization in Asia, Africa and Latin America* 24(4):13-17.
- Cisneros, J.M., A. Cantero, J. Marcos, A. Degioanni, E. Bricchi, O. Giayetto, C. Cholaky, E. Bonadeo, G. Cerioni, y M. Uberto. 1998. Comportamiento de un subsolador alado adaptable a implementos de uso común. p. 128-136. *In: Ingeniería rural y mecanización agraria en el ámbito latinoamericano*. Editorial Universidad Nacional de la Plata, La Plata, Argentina.
- Di Prinzi, A.P., S.N. Behmer, G.L. Striebeck, J.A. Irisarri, y R.O. Rodríguez. 1999. Respuesta de un cultivo de manzanos cv. Royal Gala al subsolado previo a la plantación. p. 66. *In: Memorias del VII Congreso Nacional de Horticultura*, Montevideo, Uruguay. 8-11 de junio.
- IDAE. 2006. Ahorro, eficiencia energética y sistemas de laboreo agrícola. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid, España. 2ª Edición corregida.
- McKyes, E. 1985. *Soil Cutting and Tillage*. Elsevier, Amsterdam, 217 p. (Developments in Agricultural Engineering No 7).
- Michel, J., K. Fornstrom and J. Borreli. 1985. Energy Requirements of two tillage system for irrigated sugarbeets, dry beans and corn. *Transactions of the ASAE* 28(6):1731-1735.
- Spoor G. and R.J. Godwin. 1978. An experimental investigation into deep loosening soil by rigid tines. *J. Agric. Engng. Res.* 23:243-258.

4.2 Productos de la Fase II (Labranza Vertical)

4.2.1. Desarrollo de un prototipo articulado de arado de cinceles para la aplicación variable de labranza primaria.

Un prototipo articulado de arado de cinceles fue diseñado y modelado (ver anexo II) en el Departamento de Maquinaria Agrícola de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. El software utilizado fue el Creo Parametric 2.0, posteriormente, la empresa TECNOMECA AGRICOLA, BISON fue quien se encargó de la fabricación. Ver especificaciones en el cuadro (4.1).

Como se muestra en la figura (4.5) la sección frontal apta para dos o cuatro cinceles frontales y la sección articulada para uno o dos cinceles profundos con alas.

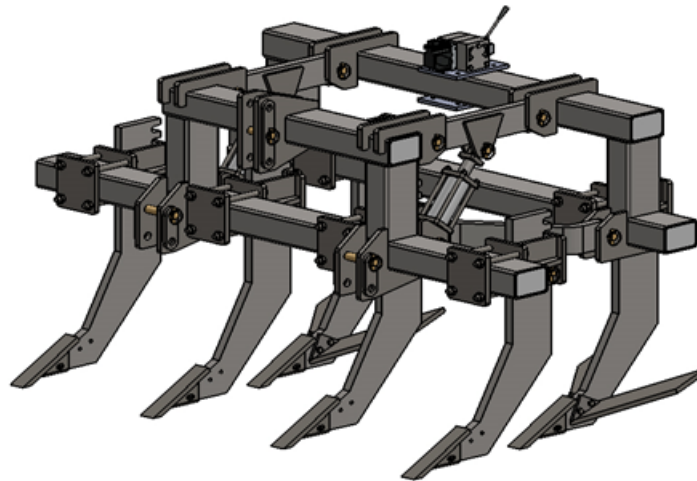


Figura 4.5: Diseño conceptual del prototipo articulado de arado de cinceles.

4.2.2 Se construyó un prototipo articulado de arado de cinceles con características y parámetros para su operatividad en labranza vertical profunda ver Figura 4.6

Cuadro 4.1: Parámetros de diseño

Parámetros técnicos de diseño del prototipo articulado de arado de cinceles	
Ancho de trabajo	2.40 m
Dos secciones	Sección frontal fija para cuatro cuerpos de cinceles someros (única profundidad de 0.20 m) Sección articulada para dos cuerpos de cinceles profundos (0.20 m , 0.30 m y 0.40 m)
Nº de cuerpos	Arreglo 1 (dos cinceles someros y un cincel profundo) Arreglo 2 (cuatro cinceles someros y dos cinceles profundos)
Espaciamiento mínimo entre cinceles	0.30 m
Espaciamiento máximo entre cinceles	0.60 m
Espaciamiento entre secciones	0.60 m
Forma de cincel	semirrectos
Dimensiones de la punta	0.0508 m (2")
Profundidad máxima de trabajo	0.40 m
Actuadores hidráulicos	2
Electroválvula proporcional	Marca Danfoss

**Figura 4.6:** Prototipo articulado de arado de cinceles

4.2.3 En la segunda fase se generaron:

Una tesis de licenciatura in titulada

Cruz-Hernández, D. 2014. Evaluación de un prototipo articulado de cinceles para labranza vertical. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Participación:(Director externo de tesis)

Generación de una patente

Desarrollo de un prototipo articulado de arado de cinceles para la aplicación variable de labranza vertical profunda. No de folio. MX/E/2014/042299,MX/U/2014/000293.

Participación: Co-autor Estatus: en proceso de tramites de formulación y recepción

4.3 Productos de la Fase III (Agricultura de Precisión)

4.3.1. Desarrollo de un carro-portasensores para el diagnóstico de propiedades físicas del suelo

4.3.1.1 La construcción del carro porta-sensores se llevó a cabo en las instalaciones del centro de investigación y desarrollo de Aguascalientes (IDEA), de la empresa TECNO-MEC AGRICOLA S.A. de C.V. en Aguascalientes, México. En la figura (4.7) se muestra en carro porta-sensores desarrollado con los diferentes aditamentos para el muestreo de la resistencia a la penetración de suelo y la profundidad de (RP). Entre ellas el actuador del hidráulico del penetrómetro.

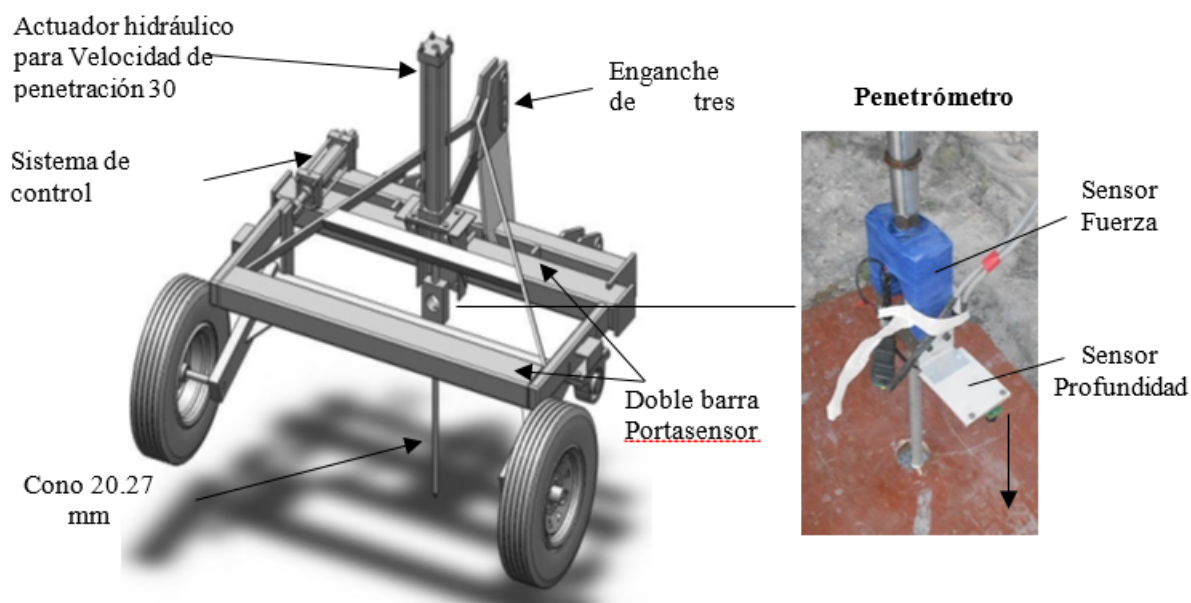


Figura 4.7: Carro-portasensores desarrollado con el penetrómetro acoplado.

Cuadro 4.2: Especificaciones técnicas del penetrómetro.

Tipo	Especificación
Variables	Resistencia a la penetración(MPa) Profundidad (mm)
Accionamiento penetrómetro	Hidráulico
Cono	Norma ASAE S313.3
RP máxima	9MPa (cono ϕ 20.27mm)
Profundidad máxima	0.60 m
Velocidad de penetración	30 mms-1 (Norma ASAE 542)
Precisión profundidad	± 0.01 m
Localización (X,Y,Z)	Pantalla AgGPS FMX + RTK
Precisión localización	Vertical 0.0254 m (RTK)

4.3.1.2 Las pruebas de laboratorio muestran que el desarrollo del sensor de RP presenta alta confiabilidad en la respuesta a la detección de fuerzas conocidas. En la figura (4.8) se observan los resultados de la calibración del transductor de anillo simple con una sensibilidad de 13.15NmV⁻¹ y un coeficiente de correlación de 99.6% entre la fuerza aplicada y el voltaje de salida. En la figura (4.9) se observan los resultados de calibración del sensor de profundidad con una sensibilidad de 258.5mm.V⁻¹ y un coeficiente de correlación de 100% entre la profundidad de penetración y la salida de voltaje.

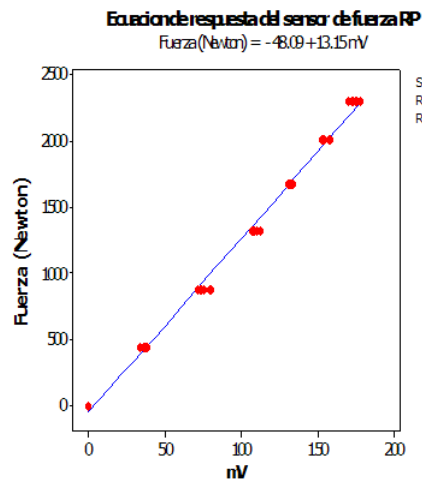


Figura 4.8: Sensor de anillo simple.

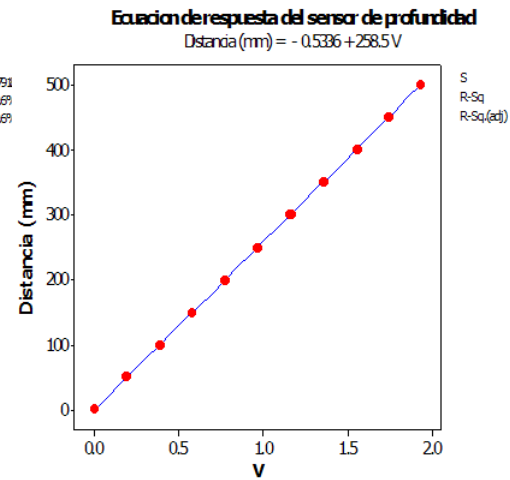


Figura 4.9: Sensor de profundidad.

4.3.1.3 El desempeño del equipo presenta una adecuada funcionabilidad de los componentes mecánicos y electrónicos, con niveles de error menores al 1 % y alta precisión de muestreo para la fuerza y profundidad. La configuración del carro portasensores para la medición de resistencia a la penetración en campo se muestra en la Figura (4.10), donde se muestra además del carro la antena de corrección de posición satelital (RTK).

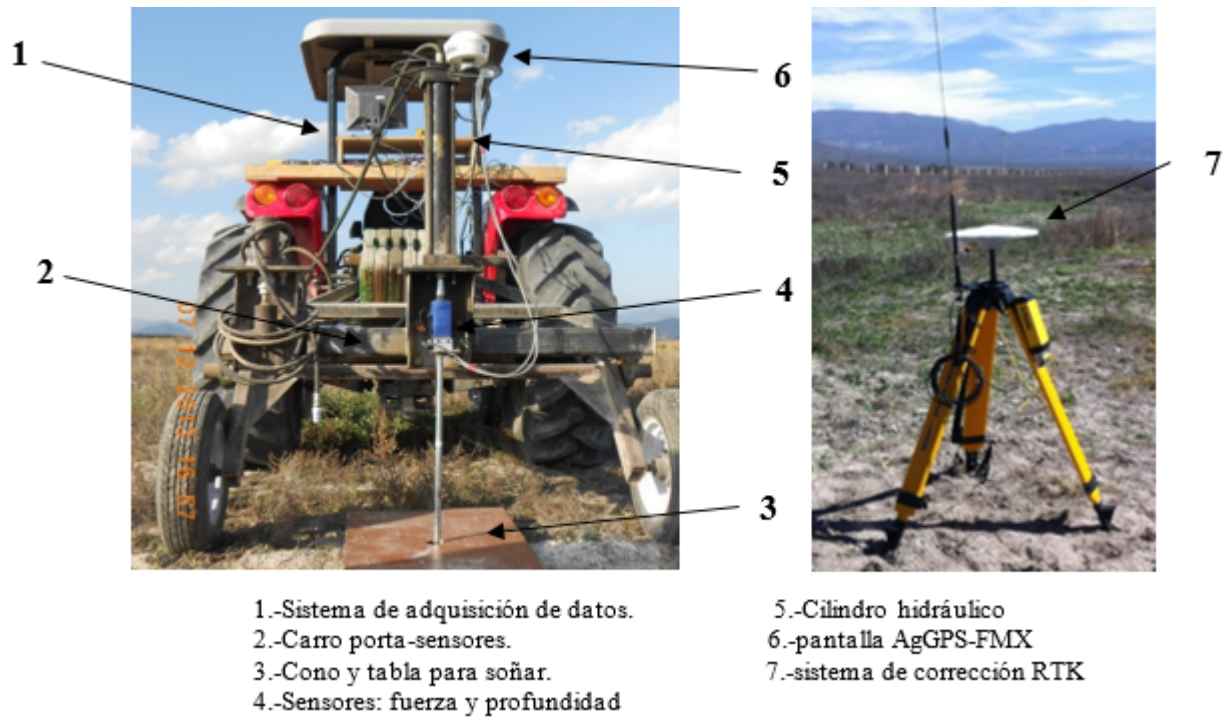


Figura 4.10: Carro portasensores y componentes del sistema de muestreo para la medición de (RP) en campo.

4.3.1.4 Se generaron mapas de diagnóstico (ver metodología en anexo III) de RP a las profundidades de 0.20, 0.30 y 0.40 m con precisión RTK. Dichos mapas contienen atributos de la ubicación de las capas compactadas y la magnitud de la RP. Una aplicación potencial de este sensor es la de identificar zonas para la labranza de profundidad variable de sitio específico. En la figura (4.11a) se observa los resultados obtenidos de resistencia a la penetración a la profundidad de 0.20 m, con rangos que van desde 0.644 hasta 1.656 Mpa. En la figura (4.11b) se observa los resultados obtenidos a la profundidad de 0.30 m, con rangos que van desde 1.30 hasta 2.35 Mpa. En la figura (4.11c) se observa los resultados obtenidos a la profundidad de 0.40 m, con rangos que van desde 1.710 hasta 3.960 Mpa.

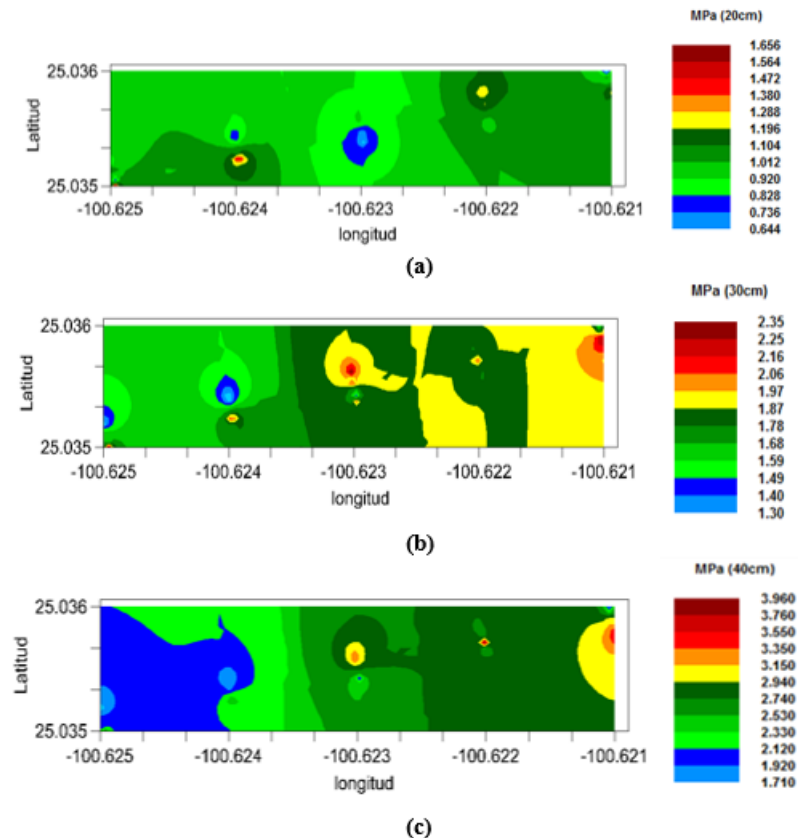


Figura 4.11: Mapas de la resistencia a la penetración del suelo (MPa) a profundidades de a) 0.20, b) 0.30 y c) 0.40 m.

4.3.1.5 En la tercera fase se generaron:

Dos tesis de licenciatura in tituladas

Ruíz-Hernández, J.A. 2014. Evaluación de sensores para el monitoreo dinámico de la permisividad eléctrica para la generación de mapas de diagnóstico. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

López-López, G.F. 2014. Evaluación de sensores para el monitoreo de la resistencia a la penetración del suelo para la generación de mapas de diagnóstico. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Participación:(generación de información en trabajos de campo)

Una tesis de maestría in titulada:

López-López, J.A. 2014. Desarrollo y evaluación de sensores para la medición de parámetros físicos del suelo aplicados en la generación de mapas de diagnóstico.

Participación:(Director externo de tesis)

Un artículo científico indexado en la Revista Nacional TERRA LATINOAMERICANA.

López-López, J.A, S.G. Campos-Magaña; M. Cadena-Zapata, M.A. Reynolds-Chavez, N. Cuervo Piña.2014. Desarrollo de un penetrómetro con tecnología GPS-RTK para la generación de mapas de diagnóstico.

Participación: Co-autor Estatus: artículo en revisión con carta de recibido

4.3.2. ARTICULO CIENTÍFICO II- *Desarrollo de un Penetrometro con Tecnología GPS-RTK para la Generación de Mapas de Diagnóstico*

DESARROLLO DE UN PENETROMETRO CON TECNOLOGIA GPS-RTK PARA LA GENERACION DE MAPAS DE DIAGNÓSTICO

Development of Soil Penetrometer with RTK-GPS Technology in the Generation of Diagnosis Maps

López-López J.A.¹, S.G. Campos-Magaña^{2‡}, M. Cadena-Zapata², M.A. Reynolds-Chávez¹, N. Cuervo-Piña¹.

¹ Estudiante de posgrado en Ingeniería UAAAN, ² División de Ingeniería, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, 25315 Saltillo, Coahuila, México.

‡ Autor para correspondencia (camposmsg@hotmail.com).

RESUMEN

Uno de los objetivos de la agricultura de precisión es la generación de información precisa acerca de las propiedades del suelo para optimizar la aplicación de insumos y satisfacer necesidades específicas del terreno. En particular, la resistencia a la penetración (RP) es un factor que mide la compactación del suelo la cual limita el crecimiento de las raíces y el rendimiento del cultivo, lo cual requiere ubicar y cuantificar el valor de RP. El presente trabajo describe el desarrollo de un sistema para la medición y seguimiento de algunas propiedades físicas del suelo, específicamente de un penetrómetro integrado con dos sensores (resistencia y profundidad) aplicados junto con tecnología RTK-GPS para la generación de mapas de diagnóstico de capas compactadas. El primer sensor desarrollado fue para la medición de la (RP) utilizando un transductor de anillo simple con capacidad de hasta nueve MPa, con una sensibilidad de 13.15 NmV^{-1} y un coeficiente de correlación de 99.6% entre la fuerza aplicada y el voltaje de salida. El segundo sensor, se desarrolló para determinar con alta precisión la profundidad de (RP) con un desplazamiento de trabajo máximo de 0.60 m, con una sensibilidad de 258.5 mm.V^{-1} y un coeficiente de correlación de 100% entre la

profundidad de penetración y voltaje de salida. Para la evaluación en campo, se utilizó el carro porta-sensores acoplado al enganche del tractor para el accionamiento hidráulico del penetrómetro. Se realizó un muestreo sistemático de 30 puntos utilizando la tecnología (RTK-GPS) obteniendo los valores y localización de RP con una precisión de 0.025 m en una profundidad de trabajo hasta de 0.40 m, se generaron mapas en el software Gs+ V.9 utilizando la interpolación inverso de la distancia (IDW), para tres profundidades diferentes: 0.20, 0.30 y 0.40 m obteniendo el rango de valores (0.644-1.656), (1.30-2.35) y (1.71-3.96 MPa), respectivamente.

Palabras clave: resistencia a la penetración, sensores de fuerzas, sensores de posición, agricultura de precisión.

SUMMARY

One of the objectives of precision agriculture is the generation of accurate information about soil properties to optimize the application of inputs and to satisfy the specific requirements of the field. In particular, resistance to penetration (RP) is a factor that measures soil compaction, which limits the growth of roots and crop yield, so it is important to determine and locate its value. This paper describes the development of a system for measuring and monitoring of some physical soil properties, specifically an integrated penetrometer with two sensors (resistance and depth) applied with RTK- GPS technology for generating of compacted layers diagnostic maps. The first sensor was developed for the measurement of (RP) using a simple ring transducer with up to 9 MPa, with a sensitivity of 13.15 NmV^{-1} and a correlation coefficient of 99.6% between the applied force and the output

voltage. The second sensor was developed to determine with high accuracy the precision depth of RP with a maximum work displacement of 0.60 m, with a sensitivity of 258.5 mm.V⁻¹ and a correlation coefficient of 100% between the penetration depth and the voltage output. For field evaluation, a portable sensors carriage prototype was attached to the three-point hitch of the tractor; the penetrometer is driven by a hydraulic actuator. A systematically sampling with 30 points was performed using (RTK -GPS) technology to obtain the values of RP and its location with an accuracy of 0.025 m in a range of working depth up to 0.40 m . Three maps were generated in the Gs+9v. software. The inverse of the distance (IDW) interpolation tools was used in three different ranges of depths: 0.20, 0.30 and 0.40 m. obtaining values of (0.644-1.656) (1.30-2.35) and (1.71-3.96 MPa), respectively.

Index word: penetration resistance, force sensors, position sensors, precision agriculture.

INTRODUCCIÓN

La agricultura de precisión (AP) tiene dentro de sus objetivos proporcionar información puntual acerca de las propiedades del suelo para conocer en qué medida éstas satisfacen las necesidades específicas del cultivo y a partir de ello optimizar la aplicación de insumos. La AP está basada en la existencia de la variabilidad del ambiente lo cual requiere de la aplicación de distintas áreas de tecnología para estimar y evaluar dichas variaciones tales como un sistema de posición global (GPS), sensores remotos y locales, así como sistemas de información geográfica (SIG) (Zhang *et al.*, 2002).

La AP está siendo ampliamente difundida, incrementando el interés en el uso de sensores para la obtención de información de las variables del suelo y de los cultivos. (Andrade *et al.*, 2004) muchos de estos sensores están acoplados a un sistema de posicionamiento global (GPS), para obtener los mapas de las diferentes variables. Los datos obtenidos y procesados con SIG son la base de la información para determinar la variabilidad de los suelos agrícolas. Mediante el uso de técnicas geoestadísticas, la variabilidad espacial de los parámetros del suelo puede ser evaluada, lo que facilita una gestión regionalizada, siguiendo los objetivos de la agricultura de precisión, es decir, la realización de operaciones de labranza de acuerdo con esta variabilidad espacial (Paz *et al.*, 2000).

El estudio de la variabilidad de las propiedades físicas del suelo tiene un papel importante en la cuantificación de las necesidades de laboreo del suelo, en función de los requerimientos de desarrollo de cultivo. En particular, la resistencia a la penetración (RP) es un parámetro directamente relacionado con la compactación, que es resultado del aumento en densidad y disminución de la porosidad lo que implica un deterioro de la estructura que limita el crecimiento de las plantas y el rendimiento del cultivo (Dexter *et al.*, 2007). Por lo anterior, es de suma importancia cuantificar y georreferenciar el valor de la RP en el terreno. La característica mecánica del suelo como la resistencia a la penetración proporciona información útil sobre la ubicación en espacio y profundidad de capas compactadas del suelo. Los suelos compactados reducen las tasas de crecimiento de las raíces de los cultivos y así limitan la disponibilidad de agua y nutrientes a la planta (Upadhyaya *et al.*, 1999). La detección precisa de la resistencia del suelo y la ubicación de capas duras es un paso importante para el éxito de la labranza de precisión. Se están desarrollando tecnologías para

la medición de la resistencia del suelo sobre la marcha para identificar las capas duras para apoyar el desarrollo de la labranza de sitio específico. Varios investigadores han llevado a cabo estudios para la medición del perfil de la compactación del suelo utilizando dispositivos diseñados para funcionar de una manera similar a una herramienta de labranza. Glancey *et al.*, (1989) y Adamchuk *et al.*, (2001) desarrollaron vigas en voladizo instrumentadas con galgas extensiométricas para medir la distribución de la fuerza de corte del suelo en la viga. Como aplicación práctica, penetrómetros horizontales han sido desarrollados y empleados para la caracterización de la distribución de la resistencia mecánica del suelo en diferentes profundidades (Sirjacobs *et al.*, 2002. Andrade *et al.*, 2008).

El penetrómetro de cono del suelo, es un dispositivo que mide la fuerza requerida para empujar un cono de metal verticalmente hacia abajo en el suelo (ASAE, 2002a). Los penetrómetros son ampliamente utilizados para medir la resistencia del suelo a la penetración, expresado como la fuerza por unidad de área de sección transversal de la base del cono (Bengough *et al.*, 2001). El penetrómetro de cono del suelo ha sido automatizado y modificado para mejorar la tasa de adquisición de datos y evaluado para producir mapas de la resistencia del suelo (Clark, 1999, Raper *et al.*, 1999; Price, 2002). Varios autores han desarrollado un sistema de penetrómetro basado en DGPS montado tractor utilizado para cuantificar la resistencia del suelo a la penetración georreferenciada (Khalilian *et al.*, 2002; Bonn *et al.*, 2005).

En la última década, la integración sensores con los Sistemas de Navegación Global por Satélite (GNSS) han proporcionado mediciones en tiempo real a nivel de precisión de

centímetros y significativamente mejorado la precisión espacial de los datos necesarios para la agricultura de precisión (Wilson, 2000; Pérez *et al.*, 2011). Los receptores GNSS son una parte clave de las tecnologías de la agricultura de precisión. La información de posición es un requisito para el manejo del cultivo de sitio específico y algunas aplicaciones de agricultura de precisión, tales como: el monitoreo de rendimiento, muestreos de suelo o aplicación variable de insumos, las cuales se llevan a cabo con suficiente precisión con los sistemas diferenciales (DGPS) y en tiempo real (RTK-GPS), con la posibilidad de la transición de las técnicas específicas del lugar con alta precisión.

La adquisición de equipos de agricultura de precisión es un tema de gran importancia en las zonas de alta productividad agrícola en México, en la actualidad se cuenta en forma limitada con equipos para determinar los requerimientos a nivel espacial de propiedades físicas del suelo para optimizar las producciones agrícolas en los componentes de siembra, fertilización y control de plagas y enfermedades. Similar situación se presenta en la labranza, en donde no se conocen en México registros de contribuciones científicas en el manejo variable de laboreo de suelo. Por lo anterior, se requiere disponer de sistemas integrados o dispositivos electrónicos para la generación de mapas de diagnóstico de las propiedades físicas, químicas y biológicas de suelos agrícolas y su interacción con los mapas de rendimiento, que permitan la elaboración de mapas de prescripción de aplicaciones de insumos entre los que destacan la aplicación de energía diferenciada en el laboreo del suelo.

Debido a que la compactación (que puede ser ubicada por la RP del suelo) es un factor limitante en los rendimientos de las producciones agrícolas y que el uso de la labranza para su adecuada corrección representa altos consumos en la demanda de energía al tratar el

suelo como si el problema fuese homogéneo, el propósito de la presente investigación fue el desarrollo de un sistema para la medición de la resistencia a la penetración del suelo que cuenta entre otros con sensores para la medición de fuerza y profundidad de (RP) complementados con tecnología (GPS-RTK) en forma digital, con la finalidad de generar mapas de diagnóstico de alta precisión que puedan ser prescritos para la aplicación de laboreo variable.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó el desarrollo de un carro portasensores, con acoplamiento al enganche de los tres puntos del tractor. El carro cuenta con un actuador hidráulico para controlar la altura de la doble barra donde se pueden montar los sensores para la medición de las propiedades físicas del suelo entre ellas el penetrómetro. Los componentes que integran el penetrómetro desarrollado son dos sensores: el primer sensor para la medición de fuerza de (RP), se empleó el método desarrollado por Campos, (1995), para diseñar un sensor de fuerzas tipo anillo simple con capacidad de 10 KN, El tipo de acero empleado en la construcción del transductor fue 1020(AISI) con un esfuerzo límite de cedencia de 380 MPa. Las galgas extensiométricas utilizadas fueron de 350 Ω tipo KFG-5-350-C1-11 de la marca Kyowa con un factor de galga de 2.11, en un arreglo de puente de Wheatstone completo. La colocación de las galgas en el anillo fue en la parte interior y exterior, empleando para su montaje el procedimiento descrito por Sakurai (1996). Para su operación, a este sensor de anillo simple se acopla en su extremo superior el vástago del actuador hidráulico y en su extremo inferior la sonda con una punta cónica de 20.27 mm de base y ángulo de 30° (Norma ASAE S313.3, 2002a).

El segundo sensor para medición de profundidad de penetración fue diseñado para mediciones en un rango hasta de 600 mm y está integrado por un sensor de distancia LV-MaxSonar-EZ1 de la empresa MaxBotix, dos amplificadores de instrumentación en serie AD620AN y un filtro pasa-baja Resistivo-Capacitivo (RC). Esta combinación proporciona mediciones con bajo porcentaje de error al realizar el registro en el sistema de adquisición de datos. La velocidad de penetración fue de $30\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (Norma ASAE EP542, 2002b).

La calibración del sensor de fuerza se realizó aplicando pesos conocidos para la obtención de la constante de proporción entre la carga aplicada y el voltaje de salida. La calibración del sensor de profundidad se realizó en un rango trabajo 0mm a 500 mm, en intervalos de 50 mm, para la obtención de la constante de proporción entre la distancia y el voltaje de salida. Para ambas calibraciones se empleó el programa DaqView 9.1.27 para el registro de la información a una frecuencia de muestreo de 20 Hz. La generación de la ecuación de calibración, se realizó una regresión lineal empleando el programa Minitab V16.

Para la determinación de la RP en campo se utilizó un tractor acondicionado, que permitió las facilidades de conectividad y acoplamiento de los equipos de seguimiento y registro de la información. La instrumentación en el tractor incluyó los siguientes equipos: un convertidor analógico-digital con almacenamiento de datos marca IOTECH modelo Daqbook/2000, un amplificador de señales de la misma marca modelo DBK43a y un controlador o pantalla AgGPSFMX de Trimble.

Las evaluaciones en campo del sistema desarrollado para la determinación de la (RP) se realizaron en el campo experimental “Navidad”, perteneciente a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicado en el estado de Nuevo León, México. Con coordenadas 25° 01′ 50.88″ N, 100° 37′ 35.65″ O, y altitud de 1884 MSNM. La textura del suelo de evaluación fue Migajón con contenidos medios de 42% arena, 36% limo y 22% de arcilla, con humedad promedio del 15% y densidad aparente de 1.07gcm⁻³.

El equipo utilizado para georreferenciación o posición de la variable de muestreo fue la pantalla integrada AgGPS FMX de TRIMBLE, adicionalmente se utilizó la señal de corrección RTK (Real Time Kinematic), para obtener precisiones con un grado de error inferior a 0.0254 m, en el cuadro (1) se observan las especificaciones del penetrómetro.

Cuadro 1. Especificaciones técnicas del penetrómetro.

Tipo	Especificación
Variables	Resistencia a la penetración(MPa) Profundidad (mm)
Accionamiento penetrómetro	Hidráulico
Cono	Norma ASAE S313.3
RP máxima	9MPa (cono \varnothing 20.27mm)
Profundidad máxima	0.60 m
Velocidad de penetración	30 mms-1 (Norma ASAE 542)
Precisión profundidad	\pm 0.01m
Localización (X,Y,Z)	Pantalla AgGPS FMX + RTK
Precisión localización	Vertical 0.0254 m (RTK)

Las profundidades de evaluación fueron de 0.20, 0.30 y 0.40m donde se determinó la media, mediana, máximo, mínimo y coeficiente de variación (CV). Para la clasificación de la variabilidad del parámetro muestreado, se tomó el criterio de Warrick y Nielsen (1980):

variabilidad baja para CV menores de 12%, variabilidad media entre 12 y 60% y variabilidad alta para CV mayores a 60%. Posteriormente al muestreo, se realizó la interpolación con el método Inverso de la distancia (IDW) para la superficie total y se generaron los mapas de resistencia a la penetración para cada una de las profundidades evaluadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El desarrollo tecnológico se realizó del periodo 2010 al 2014, en las instalaciones del laboratorio de mecánica-electrónica del departamento de maquinaria agrícola de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Las pruebas de laboratorio muestran que el desarrollo del sensor de RP presenta alta confiabilidad en la respuesta a la detección de fuerzas conocidas. En la figura (1) se observan los resultados de la calibración del transductor de anillo simple con una sensibilidad de 13.15NmV^{-1} y un coeficiente de correlación de 99.6% entre la fuerza aplicada y el voltaje de salida. Resultados similares fueron reportados por Sun *et al.*, (2006), Laffita *et al.*, (2012), para la calibración estática de una celda de carga para medición continua de (RP) y de un transductor tipo “S”, respectivamente, aplicando valores de pesos conocidos.

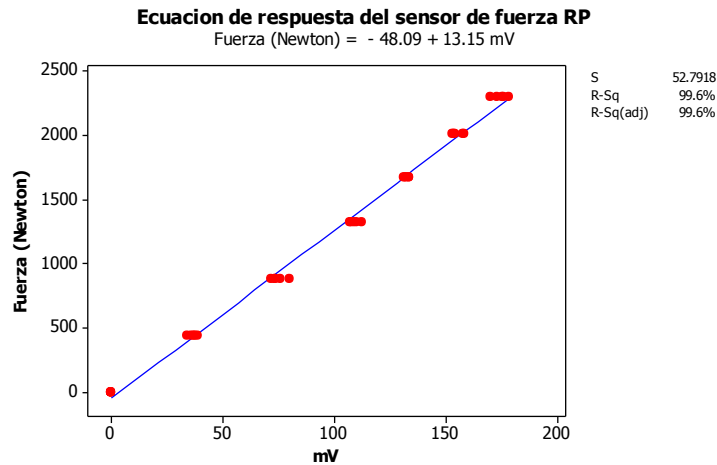


Figura 1. Ecuación de respuesta del sensor de fuerza de RP.

En la figura (2) se observan los resultados de calibración del sensor de profundidad con una sensibilidad de $258.5 \text{ mm} \cdot \text{V}^{-1}$ y un coeficiente de correlación de 100% entre la profundidad de penetración y la salida de voltaje.

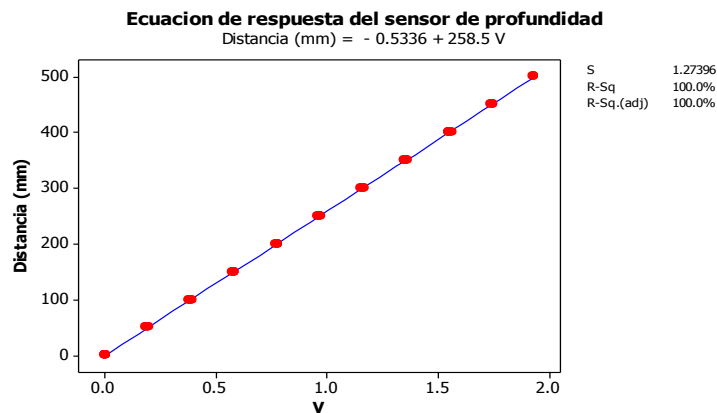


Figura 2. Ecuación de respuesta del sensor de profundidad.

La construcción del carro portasensores se llevó a cabo en las instalaciones del centro de investigación y desarrollo de Aguascalientes (IDEA), de la empresa TECNOMECA AGRICOLA S.A. de C.V. en Aguascalientes, México. En la figura (3) se muestra el carro portasensores desarrollado con los diferentes aditamentos para el muestreo de la resistencia a la penetración de suelo y la profundidad de (RP). Entre ellas el actuador del hidráulico del penetrómetro.

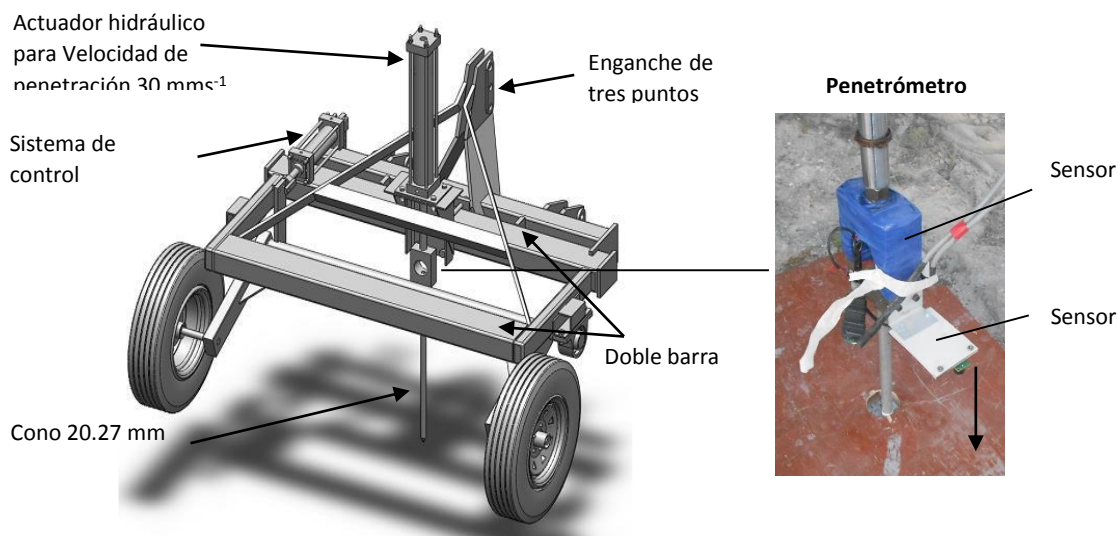


Figura 3. Carro-portasensores desarrollado con el penetrómetro acoplado.

La validación en campo del sistema de monitoreo de resistencia a la penetración se llevó a cabo con un muestreo sistemático de 30 puntos a partir de una muestra simple en una superficie de una hectárea, con lecturas continuas de (RP) de 0-400 mm de profundidad, controlada por una válvula reguladora de flujo y el sistema hidráulico del tractor. El desempeño del equipo presenta una adecuada funcionabilidad de los componentes mecánicos y electrónicos, con niveles de error menores al 1 % y alta precisión de muestreo para la fuerza y profundidad. La configuración del carro portasensores para la medición de resistencia a la penetración en campo se muestra en la Figura (4), donde se muestra además del carro la antena de corrección de posición satelital (RTK).



1.-Sistema de adquisición de datos.

2.-Carro porta-sensores.

3.-Cono y tabla para soñar.

5.-Cilindro hidráulico

6.-pantalla AgGPS-FMX

7.-sistema de corrección RTK

Figura 4. Carro portasensores y componentes del sistema de muestreo para la medición de (RP) en campo.

En las figura (5) se muestra una gráfica de los muestreos continuos obtenidos con el sensor de fuerza y profundidad (figura 6) de resistencia a la penetración bajo condiciones de campo.

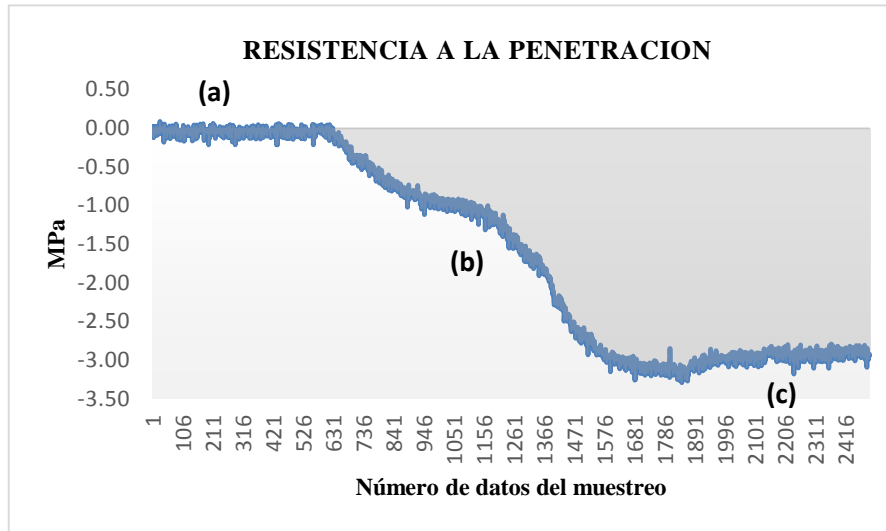


Figura 5. Resultados de las gráficas obtenidas en campo para RP.

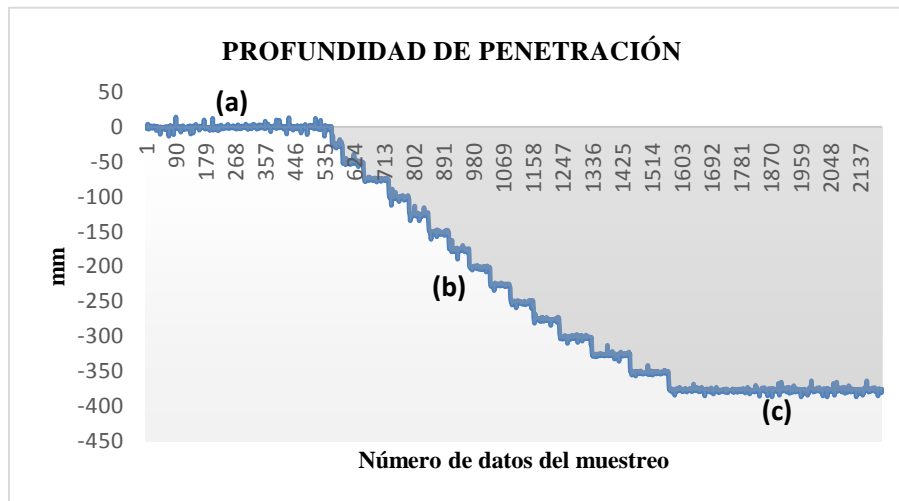


Figura 6. Resultados de las gráficas obtenidas en campo para profundidad.

La figura (5 y 6) (a) se observa estabilidad de monitoreo los primeros 500 datos cuando la sonda aún no ha penetrado el suelo, en la sección (b) la sonda ya penetró el suelo y manda las señales de la (RP) y profundidad al sistema de adquisición de datos. En la sección (c) las señales del sonar y del penetrómetro se estabilizan ya que la sonda ha dejado

nuevamente de penetrar el suelo; esto pudo ser ocasionado por dos factores: el carroportasensores fue levantado por la resistencia del suelo a ser penetrado (capas compactadas) y que supera el esfuerzo normal transmitido por el carro al suelo (9MPa) o por que alcanzó la profundidad de muestreo y es detenido el muestreo.

En la figura (7) se observa el resultado de la medición de la resistencia a la penetración vs profundidad, realizada con el penetrómetro integrado por ambos sensores. Se observa una respuesta nítida, en la medición de datos obtenidos en campo.

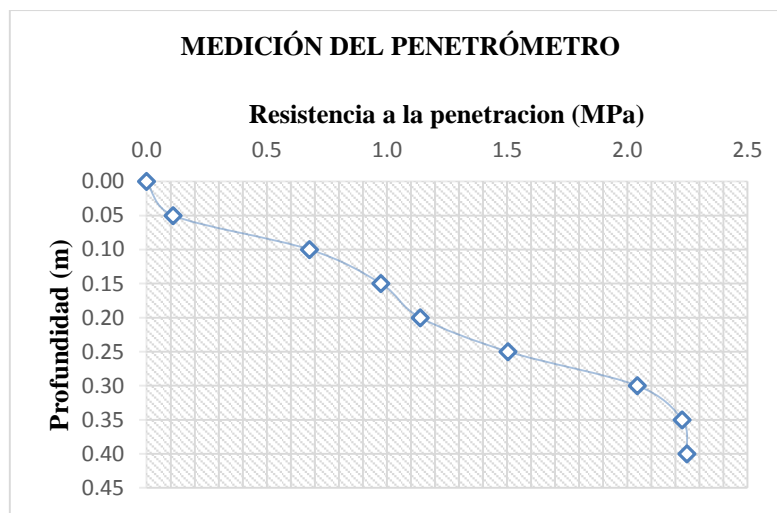
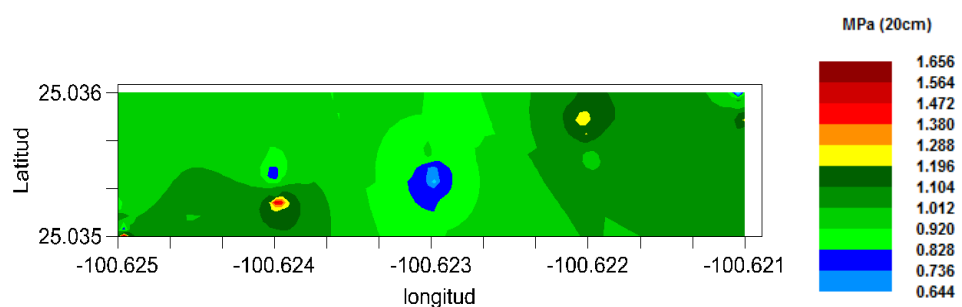


Figura 7. Resultados de la medición de resistencia a la penetración del suelo en un punto.

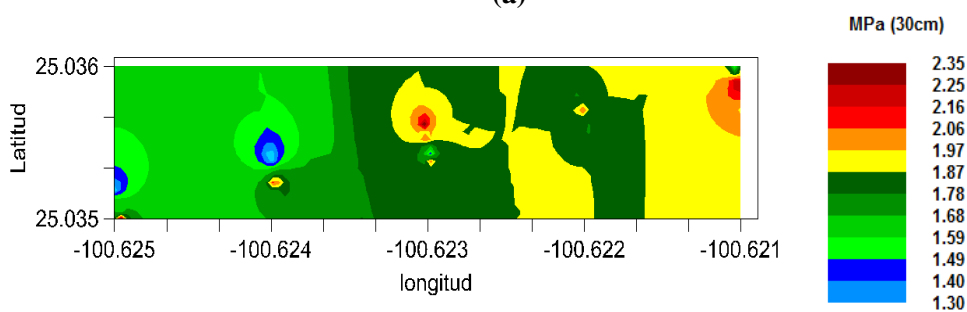
Una aplicación potencial del uso de este desarrollo, es la identificación y localización de capas compactadas con alta precisión para su posterior manejo como labranza de sitio específico o aplicación de laboreo variable. Las magnitudes de la (RP) obtenidas osciló en un rango de 0.644 y 3.96 MPa, de la superficie del suelo hasta 0.40m de profundidad. A partir de la base de datos de las variables y posición (latitud, longitud, altitud + sensor de

profundidad), se utilizó el método de interpolación inverso de la distancia (IDW), para la generación de los mapas a tres profundidades distintas (0.20, 0.30 y 0.40 m).

En la figura (8a) se observa los resultados obtenidos de resistencia a la penetración a la profundidad de 0.20 m, con rangos que van desde 0.644 hasta 1.656 Mpa. En la figura (8b) se observa los resultados obtenidos a la profundidad de 0.30 m, con rangos que van desde 1.30 hasta 2.35 Mpa. En la figura (8c) se observa los resultados obtenidos a la profundidad de 0.40 m, con rangos que van desde 1.710 hasta 3.960 Mpa. Taylor y Gardner (1963), Atwell (1993), Silva y Kay (1996), Raper *et al.*, 2005a, encontraron que con RP superiores a 2 MPa, se reduce significativamente el crecimiento de las raíces de la mayoría de las especies cultivadas. Esto nos indica, que para todos los valores medidos con el penetrómetro que excedan el valor de 2 Mpa a la profundidad de muestreo registrada, deberán ser labrados para evitar un efecto negativo en el rendimiento.



(a)



(b)

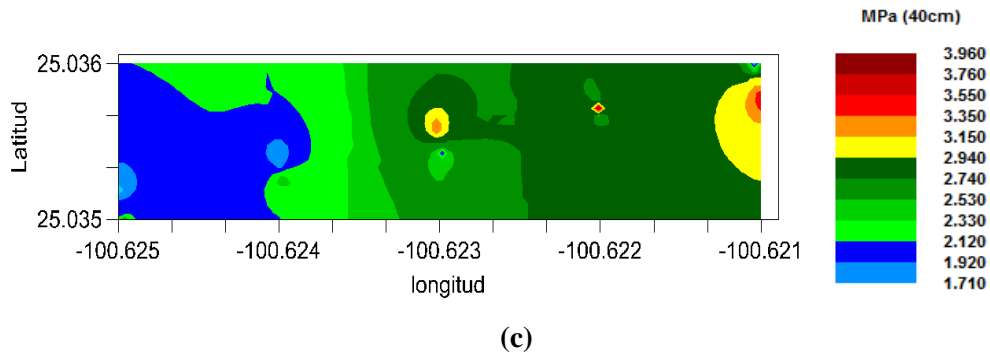


Figura 8. Mapas de la resistencia a la penetración del suelo (MPa) a profundidades de 0.20, 0.30 y 0.40 m.

En el cuadro (2) se observa el resultado de los valores de RP para las 3 profundidades monitoreadas y la clasificación de la variabilidad tomando el coeficiente de variación de la media de los datos, de acuerdo al criterio de Warrick y Nielsen (1980).

Cuadro 2. Datos de 30 puntos de muestreo de RP para la clasificación de la variabilidad.

variable	media	Desviación Estándar	varianza	mínimo	mediana	máximo	C.V.
Profundidad	----- MPa -----						%
RP 0.20m	0.9782	0.3497	0.1223	0.453	0.968	1.856	35.75
RP 0.30m	1.7836	0.5305	0.2814	0.72	1.7295	2.816	29.74
RP 0.40m	2.511	0.893	0.797	1.014	2.345	4.459	35.55

C.V. coeficiente de variación

De acuerdo al resultado del coeficiente de variación de la variable RP, para las tres profundidades, la variabilidad se clasifica como variabilidad media, ya que los valores se encuentran dentro del rango de 12 a 60 %. Los resultados de la generación de mapas de diagnóstico, demostraron que es posible determinar áreas de capas compactadas del suelo a

partir de un muestreo con alta precisión. El uso del penetrómetro equipado con GPS-RTK para su posicionamiento al nivel del mar, más la adición del sensor de profundidad o sonar nos otorga precisión vertical milimétrica. Resultados similares fueron encontrados por Clark (1999), Raper *et al.*, (2005c) reportando que la profundidad de la capa de capa dura era completamente variable, en todo el terreno desde 10 a 25 cm. En base a los mapas de diagnóstico obtenidos e identificando capas compactadas superiores a 2 MPa, se requiere que un 50% se laboree a 0.20 m, 30% a 0.30 m y el restante 20% a 0.40m.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un carro portasensores con un sistema de control de profundidad de 0.0 a 0.60 m, a la doble barra para acoplar sensores de diagnóstico de propiedades físicas del suelo. El carro permitió el acoplamiento de penetrómetro y la tecnología GPS-RTK para la determinación de la magnitud, profundidad y geolocalización de las capas compactadas de suelo.

Se desarrolló un penetrómetro integrado por dos sensores el primer para medición de fuerza es un sensor de anillo con una herramienta de penetración tipo cono con una capacidad de medición de hasta 9MPa, obteniendo una sensibilidad de 13.15NmV^{-1} y una alta confiabilidad de sensado con coeficientes de correlación del 99.6% entre la fuerza aplicada y el voltaje de salida. El segundo sensor de profundidad permite medir profundidades desde la superficie del suelo hasta una profundidad máxima de 0.60 m con precisión de hasta 0.01 m. La constante obtenida fue de 258.5mm.V^{-1} con un coeficiente de correlación de 100% entre las profundidades de penetración y la salida de voltaje.

Se generaron mapas de diagnóstico de (RP) a las profundidades de 0.20, 0.30 y 0.40 m con precisión RTK. Dichos mapas contienen atributos de la ubicación de las capas compactadas y la magnitud de la RP. Una aplicación potencial de este sensor es la de identificar zonas para la labranza de profundidad variable de sitio específico.

REFERENCIAS

- Adamchuk, V. I., M. T. Morgan, and H. Sumali. 2001. Application of a strain gauge array to estimate soil mechanical impedance on-the-go. *Trans. ASAE* 44(6): 1377-1383.
- Andrade, S. P.; K. Upadhyaya; M. Jenkins; C. Plouffe and B. Poutre: 2004. Field evaluation of the improved version of the UC Davis compaction profile sensor (UCD CPS), 12pp. ASAE Paper: 041037, USA.
- Andrade S. P., S.K. Upadhyaya, and B.M. Jenkins, 2008. Development, construction and field evaluation of a soil compaction profile sensor. *Transactions of the ASABE*. 50(3): 719-725.
- ASAE Standards, 49th Ed. 2002a. S313.3. Soil cone penetrometer. St. Joseph, Michigan.
- ASAE Standards, 49th Ed. 2002b. EP542. Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer. St. Joseph, Michigan.
- Atwell, B.J. 1993. Response of roots to mechanical impedance. *Environmental and experimental botany* 33(1): 27-40.
- Bengough, A.G., D.J. Campell, M.F. and O'Sullivan, 2001. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. In: Smith, K.A., Mullins, C.E. (Eds.), *Soil and Environmental Analysis*. Second ed. Marcel Dekker, New York, pp. 377-403.

- Boon, N.E., A. Yahya, and A.F. Kheiralla., 2005: A Tractor-mounted, Automated Soil Penetrometer shear meter Unit for Mapping Soil Mechanical Properties. *Biosystems Engineering* 90(4): 1-96
- Campos M., S.G. 1995. Force measurement-recording and data analysis for tillage tools. *Agric. Mechanization in Asia, Africa and Latin America* 26(4): 13-16.
- Clark, R. 1999. Evaluation of the potential to develop soil strength maps using a cone penetrometer. ASAE Paper No. 99-3109. ASAE St. Joseph, Michigan.
- Dexter, A.R.; E.A. Czyz and O.P., Gate, 2007. A method for prediction of soil penetration resistance. *Soil and Tillage Research*, 93:412-419.
- Glancey, J. L., S. K. Upadhyaya, W. J. Chancellor, and J. W. Rumsey. 1989. An instrumented chisel for the study of soil tillage dynamics. *Soil and Tillage Research*. 14(1):1-24.
- Khalilian, A., Y.J. Han, R.B. Dodd, J. Mike, S. Sullivan and M. Keskin, 2002. A control system for variable depth tillage. ASAE Paper No. 021209. St. Joseph, Michigan, USA.
- Laffita-Leyva, Alexander; Ernesto, Ramos-Carbajal; Armando, García de la Figal-Costales; Pedro A.; Valdés-Hernández y Torres Cepero, Raúl. 2012. Diseño, construcción y calibración de un transductor de fuerza tipo S. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 21:11-16.
- Paz, G.A.; Vieira, S.R.; Taboada, M.T. 2000. The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. *Geoderma*, 97:273-292.
- Pérez, R. M.; J. Carballido; J. Agüera; J.A. Gil. 2011. Assessing GNSS correction signals for assisted guidance system in agricultural vehicles. *Precis. Agric.*12:639-652.
- Price, R.R. 2002. Development of a dynamic cone penetrometer for research and private use. ASAE Paper No. 021048. St. Joseph, Mich.: ASAE
- Raper, R. L., B. H. Washington, and J. D. Jarrell. 1999. A tractor-mounted multipleprobe soil cone penetrometer. *Applied Engineering in Agriculture* 15(4):287-290.
- Raper, R.L., E.B. Schwab, K.S. Balkcom, C.H. Burmester and D.W. Reeves. 2005a. Effect of annual, biennial, and triennial in-row subsoiling on soil compaction and cotton yield in southeastern U.S. silt loam soils. *Applied Engineering in Agriculture*, 21(3): 337-343.
- Raper, R.L., E. B. Schwab and S.M. Dabney. 2005c. Measurement and variation of site-specific hardpans for silty upland soils in the Southeastern United States. *Soil and Tillage Research*.84: 7-17.

- Sakurai, H. 1996. An application of strain gages to the agricultural machinery. Edit. Farm machinery section. Second Training Division. Tsukuba International Center (TBIC). Japan International Cooperation Agency (JICA).
- Silva, A.P. and Kay, B.D. 1996. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. *Plant and Soil* 184: 323-329.
- Sirjacobs D., B. Hanquet, F. Lebeau and M. F. Destain. 2002. On-line soil mechanical resistance mapping and correlation with soil physical properties for precision agriculture. *Soil and Tillage Research*. 64:231-242.
- Sun Y., D. Ma, P. Schulze, O. Schmittmann and M. Rose. 2006. On-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance by a combined horizontal penetrometer, *Soil and Tillage Research*, 86:209-217
- Taylor, H.M. and Gardner, H.R., 1963. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content, and strength of soil. *Soil Sci.* 96:153–156.
- Upadhyaya, S.K., U.A. Rosa, M. Ehsani, M. Koller, M. Josiah, and T. Shikanai, 1999. Precision Farming in a Tomato Production System. Paper No. 99-1147, ASAE, St. Joseph, Michigan.
- Warrick, A. and Nielsen, D.1980. Spatial variability of soil physical properties in the field, In: *Applications of soil physics*, New York: Academic Press, p.319-44.
- Wilson, J.N. Guidance of agricultural vehicles- a historical perspective. *Comput. Electron. Agric.* 2000, 25, 3–9.
- Zhang, N., M. Wang and N. Wang. 2002. “Precision Agriculture – a world overview”. *Computers and electronics in Agriculture*, 36:113-132

4.4 Productos de la Fase IV (Agricultura de Precisión)

4.4.1. Desarrollo de una metodología para la generación de mapas de prescripción en la aplicación variable de labranza primaria

Se generó una metodología para el uso de la pantalla FMX y las facilidades del programa de nivelación Filed level II como herramienta para la implementación del sistema de control inteligente de aplicación variable de labranza vertical profunda. Esta guía contiene:

4.4.1.1 Se desarrollaron dos guías rápidas de referencias (Anexo IV) para la configuración del sistema de control inteligente.

4.4.1.2 Se generó un mapa de alturas y un mapa de cortes y rellenos por cada uno de los sitios de prueba, se procesó la información de los datos y se editó una prescripción o diseño del plano de trabajo en Field Level II para la aplicación de labranza variable. Se generaron dos prescripciones, la primera para comprobar si el sistema respondía al mapa de prescripción definido por los puntos de control editados de acuerdo al manual de la metodología propuesta; el segundo mapa se hizo con la intención de corroborar la respuesta debido a los puntos de control.

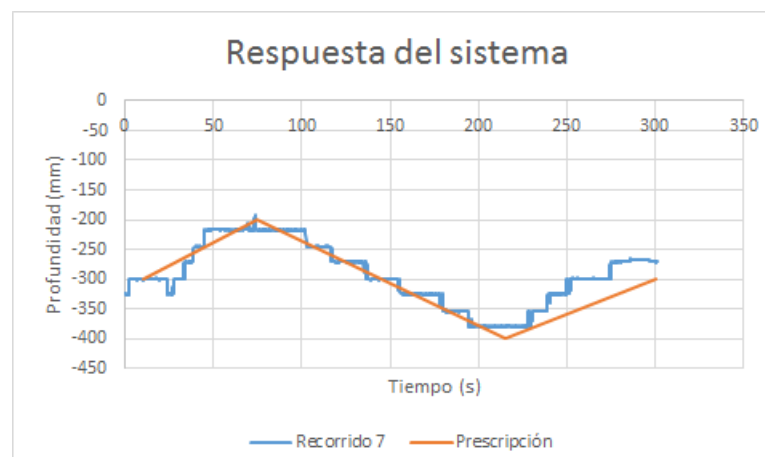


Figura 4.12: Respuesta del sistema de control a una prescripción de labranza variable.

4.4.1.3 En la cuarta fase se generaron:

Dos tesis de licenciatura in tituladas

Sánchez-Padierna, E. 2013. Labranza inteligente utilizando un control automático para profundidades variables de cinceles. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Ramon-Mendoza, L.Y. 2014 .Desarrollo de un sistema de control inteligente para laboreo primario de suelos. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Participación:(Director externo de tesis)

Una tesis de maestría in titulada:

Cuervo-Piña, N. 2014. Desarrollo y evaluación de un sistema de control inteligente de profundidad aplicado a la labranza vertical. Tesis de maestría ISP. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Participación:(Director externo de tesis)

Un artículo científico indexado en la Revista Nacional de Las Ciencias de la Universidad de Aguascalientes.

Cuervo-Piña, N., S. G. Campos-Magaña, M. Cadena-Zapata, M.A. Reynolds-Chávez, J. A. López-Lopez. 2014. Sistema inteligente para labranza vertical. Etapa I: Mapas de prescripción para la aplicación inteligente de labranza vertical.

Participación: Co-autor Estatus: artículo en revisión con carta de recibido

4.4.2. ARTICULO CIENTÍFICO III- *Sistema inteligente para labranza vertical. Etapa I: Mapas de prescripción para la aplicación inteligente de labranza vertical.*

SISTEMA INTELIGENTE PARA LABRANZA VERTICAL ETAPA I: MAPAS DE PRESCRIPCIÓN PARA LA APLICACIÓN INTELIGENTE DE LABRANZA VERTICAL.

Vertical tillage intelligent system

Stage I: Prescription maps for intelligent application vertical tillage

Neftalí Cuervo Piña¹, Santos Gabriel Campos Magaña², Martín Cadena Zapata²,

Marco Antonio Reynolds Chávez¹ y Juan Antonio López López¹.

¹ Estudiante de posgrado en Ingeniería y Sistemas de Producción, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. ² Profesor Investigador de posgrado en Ingeniería y Sistemas de Producción, UAAAN. Co-autor de contacto Santos Gabriel Campos Magaña. camposmsg@hotmail.com.

RESUMEN

Un sistema de control inteligente fue integrado a un arado articulado de cinceles para la aplicación de laboreo profundo variable. Este sistema fue manipulado usando el controlador FmX y su aplicación FieldLevel II, la cual se utiliza para la nivelación de terrenos. El sistema desarrollado permite el control variable de la profundidad de una herramienta de labranza de suelo en base al diseño de un mapa de prescripción generado de un mapa de alturas de cortes y rellenos. Basados en este principio, se diseñó una prescripción con profundidades aleatorias de 0.20, 0.30 y 0.40 m simulando la localización de las capas compactadas del suelo. Un actuador hidráulico y una válvula proporcional fueron utilizados para el control de profundidad sobre la marcha. Los resultados muestran que la aplicación Field Level II es capaz de manipular la labranza profunda del suelo en forma variable e inteligente.

ABSTRACT

An intelligent control system was integrated into an articulated chisel plow for variable deep tillage application. This system was manipulated with FMX controller and Field Level II application, which is used for land leveling. This system allows variable control of the depth of a soil cutting tool based on the design of a prescription map generated from a height map of cuts and fills. By reference on this principle, a prescription with random depths of 0.20, 0.30 and 0.40 m, simulating the location of the compacted soil layer was designed. A hydraulic actuator and a proportional valve were used for depth control on the go. The results show that the Field Level II application is capable to apply deep tillage variable and intelligently.

Palabras clave: Agricultura de precisión, Controlador FMX, señal RTK, Field Level II y laboreo primario.

Keywords: Precision Agriculture, FMX drive controllers, RTK signal, Field Level II and primary tillage.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la optimización en el uso de insumos y rendimientos en el manejo de las producciones agrícolas es una tendencia global de la agricultura de precisión. El manejo de sitio específico es imprescindible para delimitar áreas de manejo dentro del lote. Un manejo de zona se define como "una parte de un campo que expresa una combinación homogénea de los factores que limitan el rendimiento para los cuales un porcentaje único de un insumo de un cultivo específico es apropiado (Doerge, 1998). Por lo tanto, las zonas de manejo dentro de un campo pueden ser diferentes para diferentes insumos y delimitados en su aplicación para cada sitio. La forma de manejo de zonas distintas dentro de un campo es una función de la variabilidad natural dentro del campo, su tamaño y ciertos factores de manejo. Existen ciertas partes dentro de un campo que siempre producen por debajo de la línea de equilibrio, pueden ser aisladas para el desarrollo de un plan de manejo de sitio específico (Goddard, 1997).

La mayoría de los sistemas experimentales de agricultura de precisión son los sistemas basados en mapas, debido a que la mayoría de los sensores de movimiento continuo o sobre la marcha "ON-THE-GO" para campo, suelo y variabilidad de campo son demasiado caros, no son suficientemente precisos, no están disponibles o no son compatibles con las tecnologías ya desarrolladas en forma comercial.

Las bases de datos espaciales han sido generadas utilizando diversos sistemas de información geográfica, mediante la integración de mapas derivados de sensores remotos, muestreo de suelos, control de rendimiento y varios sensores. Los métodos de geo estadística avanzada se utilizan para analizar la variabilidad espacial y temporal (Pena-Yewtukhiw *et al.*, 2000). Chang *et al.* (2000) compararon diferentes enfoques para clasificar las zonas de manejo de

nutrientes. Zhang y Taylor, (1999) introdujeron los métodos de delimitación de zonas de manejo utilizando herramientas de filtrado espacial morfológico-y filtrado de herramientas espaciales. Las técnicas de cultivos de modelado se han incorporado para desarrollar mapas de potencial de rendimiento como una base para la prescripción de fertilizantes (Werner *et al.*, 2000). Según Gonçalves *et al.* (2001), una vez cuantificada la dependencia espacial de las propiedades del suelo, esta puede utilizarse para la interpolación entre observaciones, permitiendo el mapeo de la propiedad del suelo dentro del área. El mapeo de algunos factores de producción puede permitir que el campo sea subdividido, siendo el manejo de los insumos hecho de forma diferenciada en las sub-áreas (Evans *et al.*, 1995).

La medición de la variabilidad se puede lograr mediante dos enfoques: a base del enfoque de mapas y el enfoque basado en el sensor, así mismo, su aplicación es realizada a través de la tecnológica variable (**VRT**). En esta tecnología, los insumos agrícolas, tales como agua, fertilizantes, productos químicos y así sucesivamente se aplican en base a los requerimientos de cada sección del campo (Nishiwaki *et al.*, 2004).

La aplicación de **VRT** utiliza controles por medio de dispositivos electromecánicos. Así mismo, utiliza sistemas basados en sistemas de posicionamiento global y Cinemática en Tiempo Real (GPS+RTK) para la localización precisa de esas áreas o zonas delimitadas originalmente desde su diagnóstico, posterior prescripción y su aplicación. Estos sistemas de posicionamiento requieren dos receptores, un enlace de radio y controlador de navegación que integra los sensores y datos del GPS para calcular la posición final del receptor (Misra y Enge, 2006).

En la aplicación de labranza primaria variable solo existen pequeñas contribuciones a nivel experimental. Andrade y Upadhyaya (2007) presentaron un procedimiento utilizando ESRI®

ArcGIS 9.1v (ESRI, Redlands, California) un programa para la interpretación de la variabilidad espacial de la resistencia de un cortador de suelo dentro de un campo. Khalilian *et al.* (2002) reportaron la aplicación de un sistema de control para labranza variable profunda, utilizando un potenciómetro lineal para el envío de señales de posicionamiento a una válvula electrohidráulica proporcional que estaba conectada a un dispositivo de accionamiento hidráulico. Görücü *et al.* (2011) evaluaron labranza primaria a diferentes profundidades (25, 33,38 y 45 cm) ajustando el cambio de posición en las ruedas del equipo de labranza.

El propósito de esta investigación fue desarrollar una metodología para la aplicación de labranza profunda variable, a partir de la aplicación Field Level II utilizada para la nivelación de terrenos. Este sistema permite el control variable de la profundidad de una herramienta de corte de suelos en base al diseño de un mapa de prescripción generado a partir de un mapa de alturas. Basado en este principio, se diseñó una metodología para prescripciones de laboreo profundo a partir de profundidades aleatorias de 0.20, 0.30 y 0.40 m simulando la localización de capas compactadas a las profundidades descritas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Un prototipo articulado de arado de cinceles fue diseñado y construido (**registro de patente en proceso**) para aplicar labranza primaria a profundidades variables desde la superficie del suelo hasta 0.40 m. El equipo consiste de dos secciones, la parte frontal o fija y la parte trasera o móvil. Ambas estructuras utilizadas para el acoplamiento de cuatro y dos cinceles respectivamente y unidas por un mecanismo de cuatro barras, en forma de paralelogramo, el cual es movido por actuadores hidráulicos. (Figura 1). Se acondicionó un tractor que tiene la facilidad de conectividad de los sistemas de adquisición de datos. Se utilizó un

acondicionar de señales DBK43A y un convertidor analógico digital para el registro de datos DaqBook2000, componentes de la compañía Iotech, Inc. Cleveland. Estos registros de datos corresponden a los desplazamientos de la sección trasera respecto a la delantera medidos con un sensor de proximidad tipo ultrasónico LV-Maxsonar-EZ1 con precisión de 1 mm.

Un controlador FmX de Trimble serie 5224577081, integrado con sistema GPS con señal de corrección (RTK), fue utilizado junto con la antena del receptor para determinar la ubicación georeferenciada del implemento y fue posicionada en la parte articulada para controlar la profundidad de trabajo. La estación base RTK está compuesta por una antena de recepción de señal satelital, un receptor AGGPS 542 Trimble y un antena de radio para la emisión de la señal de corrección, la cual proporciona una precisión de hasta 2.54 cm en una frecuencia de 450 MHz y un alcance de 3 km.

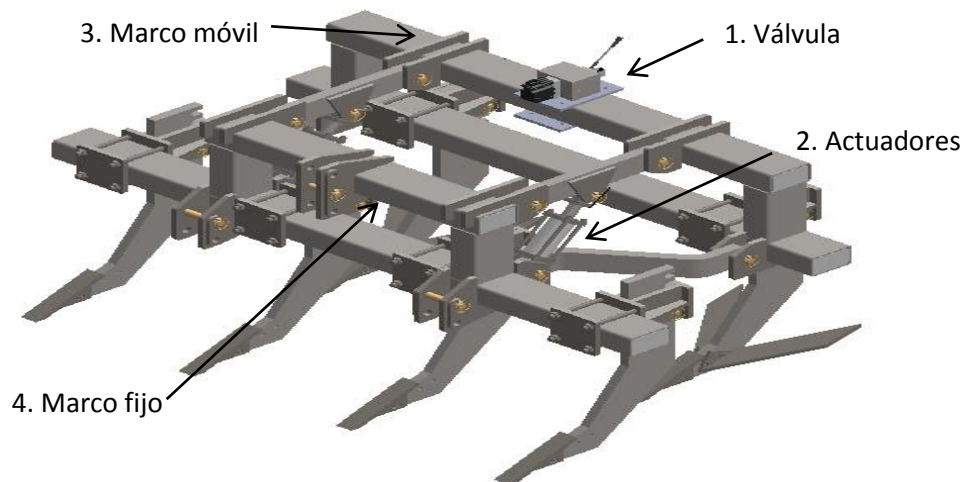


Figura 1. Prototipo articulado de arado de cinceles para labranza profunda variable

Para el control de la parte articulada del prototipo, se tiene un sistema hidráulico integrado por una válvula electrohidráulica proporcional marca Danfoss y dos actuadores hidráulicos

bidireccionales (Figura 2). Cuando la sección frontal y trasera se encuentran niveladas, la profundidad de trabajo de los cinceles delanteros es 0.20 m y 0.30 m para los cinceles traseros. El rango de operación de la sección articulada es de 0.20 a 0.40 m, por lo que la profundidad de referencia es 0.30 m y fue determinada para reducir la carrera de los cilindros, lo que permite tener un desplazamiento máximo de 0.10 m hacia arriba y hacia abajo. Los actuadores mueven la parte articulada hacia arriba y hacia abajo para controlar la profundidad de la labranza sobre la marcha, dependiendo del diseño prescrito.



Figura 2. Tecnología para la aplicación labranza profunda variable

Fuente: Foto propia

El controlador FMX (Figura 3) procesa en tiempo real las prescripciones de desplazamiento hacia arriba o hacia abajo a partir de una referencia y las envía por medio de una señal eléctrica a la válvula proporcional. El carrete de la válvula cambia el control direccional en ambos sentidos en respuesta a señales de comando variables o pulsos emitidos por el controlador FMX, proporcionando así el flujo hidráulico de salida deseado. Una vez que el



Figura 3. Tractor instrumentado (controlador FMX, GPS+ RTK, sensor de profundidad, sistemas de adquisición y procesamiento de la información). **Fuente:** Foto propia

Carrete llega a la posición establecida, el circuito electrónico interno envía una señal de retroalimentación al controlador de la unidad para mantener esa posición o continuar con algún otro desplazamiento establecido.

La facilidad Field Level II “nivelador de campo”, es una aplicación portable del controlador FMX utilizada para automatizar el proceso de mapeo y nivelación de campos, al mismo tiempo almacena internamente la información de posición recolectada del GPS y datos de nivel mientras mapea el terreno, para posteriormente exportarse a un archivo de registro que contiene el punto maestro, el limite recorrido realizado en el perímetro y su recorrido interior de la parcela.

En esta aplicación se diseñan las pendientes múltiples o un plan de nivelación basados en una referencia o puntos de control para hacer los ajustes de la pendiente natural del terreno. Cuando se está nivelando un campo, el sistema AGGPS Field Level II controlará automáticamente la herramienta de corte en base a la posición de altura del receptor, mostrando continuamente la desviación entre la posición actual y la del diseño. Con este sistema, la profundidad de laboreo se puede cambiar 0.10 m hacia arriba o abajo del punto de referencia (0.30 m) de la herramienta. La profundidad de la labranza también puede ser controlada manualmente o automáticamente a partir de un mapa de diagnóstico.

Este trabajo de investigación se llevó a cabo durante el período del año 2012 a 2014 en el laboratorio de electrónica del departamento de Maquinaria Agrícola de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México. Para ello la primera fase se inició con la calibración del sistema bajo condiciones de laboratorio donde se calibraron los sensores de posición y el tiempo de respuesta del sistema hidráulico del equipo articulado. Para la calibración estática se utilizó el arado articulado de cinceles con el tractor encendido a 1800 rpm como fuente de poder, pero sin movimiento. Se conectó el puerto de comunicación entre el controlador FmX y la válvula proporcional. Se nivelaron los marcos frontal (fijo) y posterior (móvil) del prototipo. Se acopló el sensor sonar de profundidad en el marco frontal y la base reflectora se posicionó en la parte móvil, dicho sensor de proximidad usado para la medición del desplazamiento de la parte móvil con respecto a la fija, permitiendo registrar los cambios de altura en tiempo real. Se ajustaron los datos de prueba en el DaqBook2000 a una frecuencia de registro de 20 datos por segundo para el registro de la información. Los tratamientos evaluados fueron instrucciones de cambio de distancia de la función grosero de 0.10 y 0.20 m hacia arriba (Figura 4 y **¡Error! No se**

encuentra el origen de la referencia.) y hacia abajo (Figura **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y4d) ajustados y programados a través de la pantalla y su aplicación FieldLevel II, dando un total de cuatro tratamientos, seleccionados en base a los rangos utilizados en la labranza profunda y simulando los posibles cambios de profundidad variable que van de: labranza de 0.20 m a 0.30m , labranza de 0.30 m a 0.40m o labranza de 0.20 m a 0.40 m en ambos sentidos de dirección al momento de realizar dicha operación en campo.

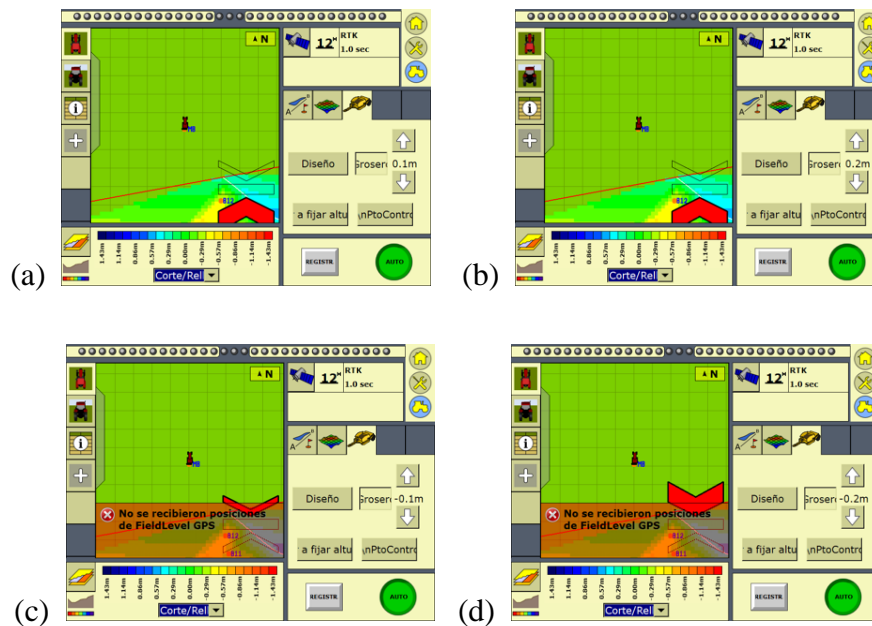


Figura 4: (a) Grosero 0.10 m arriba; (b) Grosero 0.20 m arriba; (c) Grosero 0.10 m abajo y (d) Grosero 0.20 m abajo

Las variables de respuesta a medir del sistema de control fueron: distancia total recorrida (mm), distancia por pulsos (mm s^{-1}), retardo entre pulsos(s) y error (%).

La evaluación en campo se realizó en el sitio experimental ubicado en el municipio de Galeana, Nuevo León, México, con coordenadas $25^{\circ}01'50.88''\text{N}$ y $100^{\circ}37'35.65''\text{O}$, con una altura de 1884 msnm.

Para evaluar el sistema de control inteligente utilizando mapas de prescripción, primero se acondicionó el prototipo articulado de arado de cinceles; posteriormente se calibró bajo condiciones de laboratorio y campo el sensor de distancia sonar obteniendo su ecuación de respuesta y su verificación a través de evaluaciones en forma estática y dinámica. Este sensor nos permitió determinar en tiempo real el desplazamiento hacia arriba o hacia abajo de la estructura móvil con respecto a la estructura fija cuando éstas se encontraban niveladas o paralelas. Por otra parte se evaluó la respuesta del sistema hidráulico en prescripciones de 0.20, 0.30 y 0.40 m de la estructura móvil con respecto a la estructura fija.

El uso del controlador FmX, las facilidades *Survey* y *FieldLevel II* fueron requeridas para el trazado, levantamiento topográfico, diseño y aplicación de labranza profunda variable.

La integración de una metodología nos permitió manipular un sistema de control inteligente para la labranza profunda variable basado en un mapa de diagnóstico de capas compactadas del suelo. Para evaluar la respuesta del sistema con el vehículo en movimiento, fue necesario generar un mapa de prescripción con cambios de profundidad de forma aleatoria y ejecutable por el controlador FMX.:

RESULTADOS

Se desarrolló un prototipo articulado de arado de cinceles (Figura 1) el cual permite la aplicación de labranza profunda variable. Las prescripciones utilizadas para la sección móvil son de 0.10 m por encima y por debajo de la referencia, la cual es posicionada a 0.30 m, mientras que la sección frontal permanece fija a 0.20 m, estos ajustes fueron establecidos cuando las estructuras se encuentran niveladas.

Se obtuvo el desarrollo de un sensor de distancia para la verificación de la respuesta del sistema hidráulico al desplazamiento realizado de la parte articulada del prototipo respecto de la parte fija para la aplicación de labranza profunda variables. En la Figura 5 se observa la regresión lineal obtenida en la calibración, bajo condiciones de laboratorio, en la cual se muestra una ecuación de calibración con sensibilidad de 28.04 cmV^{-1} y un coeficiente de correlación del 99.6% entre la distancia aplicada (cm) y el voltaje de salida (V).

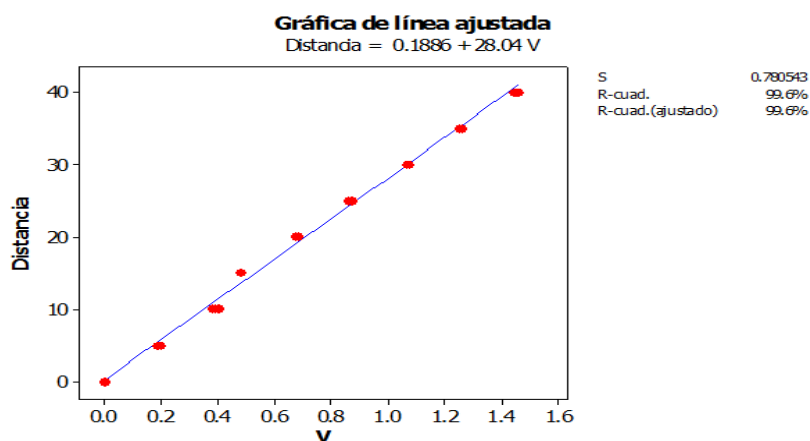


Figura 5. Ecuación de calibración del sensor de distancia

Una vez que se obtuvo la ecuación de calibración del sensor de distancia, es posible medir el desplazamiento de la sección trasera respecto de la delantera en tiempo real y bajo condiciones de campo.

La respuesta de la válvula a los cambios de prescripción de forma estática obtenidas con el sensor de distancia para una prescripción de 100 mm (Figura 6) el desplazamiento real fue de 107.68 mm con un tiempo de 21.43 segundos. En la dirección opuesta el recorrido fue de 107.78 mm en 50.25 segundos. La instrucción de 200 mm hacia arriba y hacia abajo produjo un desplazamiento de 216.18 mm en 54.02 segundos y 187.8 mm en 74.5 segundos respectivamente. La distancia recorrida en cada pulso fue en promedio de 24.5 mm en ambas direcciones, con un retardo de 7.2 segundos hacia arriba, mientras que hacia abajo realizó los pulsos cada 10.7 segundos en promedio.

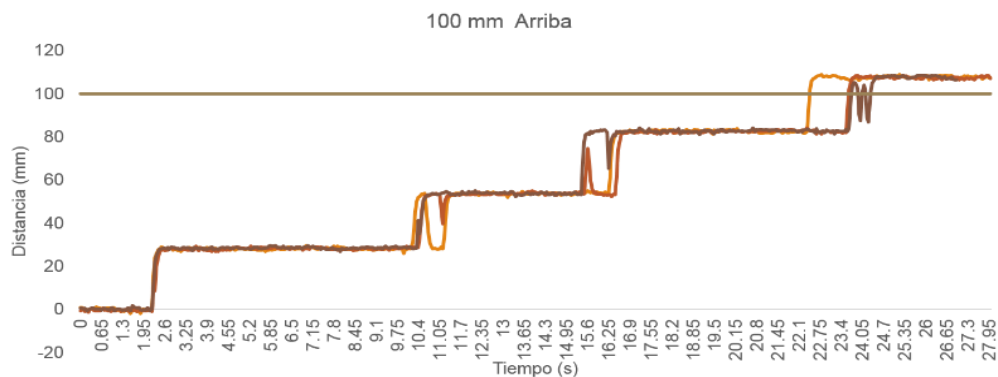


Figura 6. Respuesta de la válvula a una prescripción de 100 mm

En la evaluación dinámica fue necesario la elaboración de una metodología para la aplicación de labranza profunda variable a partir de un mapa de diagnóstico previamente generado;

mismo que permitió realizar los ajustes para el diseño de un mapa de prescripción. La metodología desarrollada es descrita a continuación:

Trazado de parcela

El sitio de prueba utilizado fue una superficie de 1.5 hectáreas, se trazaron 15 puntos en 3 franjas con 2.40 m correspondiente al ancho de trabajo del implemento, con un espaciamiento de 10 m entre franjas y 100 m entre punto de muestreos. Posteriormente se capturó la latitud, longitud y altitud en coordenadas geográficas en cada punto usando la pantalla FMX con la señal de corrección RTK. Esta actividad se realizó para simular un diagnóstico de profundidad de capas compactadas en el que a cada franja de puntos se le asignó de forma aleatoria una profundidad de 0.20, 0.30 y 0.40 m.

Levantamiento topográfico

El levantamiento topográfico se realizó con la aplicación Survey de la pantalla FMX. Primero se define y registra un punto maestro o **MBP** (Master Bench Point), considerando posicionarlo cerca del sitio de prueba y en una superficie plana o nivelada, después se delimita el lote de pruebas, haciendo un recorrido por el **LÍMITE** exterior del mismo; posteriormente se realizó un recorrido **INTERIOR** de la parcela para que el sistema registrara la pendiente natural del terreno, los espaciamientos de este recorrido fueron definidos de acuerdo a los puntos de las franjas del trazado. La pantalla realiza el registro de estos puntos en coordenadas métricas relativas al MBP, generando una base de datos en un archivo nombrado **Multiplane** con extensión **txt**. A partir de estos registros de información como base de datos el sistema es capaz de generar dos mapas, uno de alturas (Figura 7) y

otro de cortes y rellenos. La información obtenida del levantamiento es extraída por medio de un dispositivo de almacenamiento.

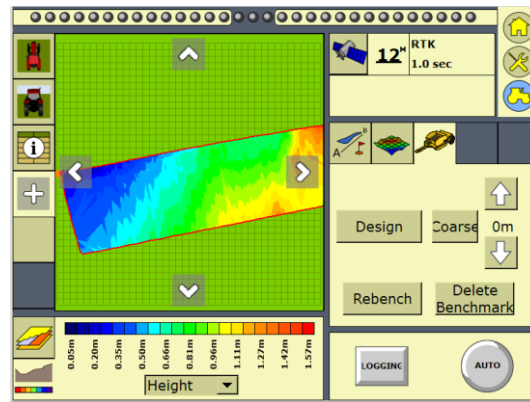


Figura 4. Mapa de alturas generado por el software Survey

Edición de Prescripción

En este paso metodológico se emplean dos bases de datos, la primera que se obtuvo en el trazado de la parcela con 15 puntos y la segunda que fue generada durante el levantamiento topográfico por la pantalla (Multiplane.txt). La base de datos del trazado contiene la ubicación de latitud y longitud en GMS.d (Grados, Minutos y Segundos decimales) y su altitud en msnm. La base de datos del levantamiento topográfico de la pantalla contiene la ubicación del MBP en G.d (Grados decimales) y a partir de esa posición, genera los puntos que definen el lote (límite) y pendiente (interior) en coordenadas métricas relativas al MBP. Para integrar los puntos del trazado a la base de datos del FMX es necesario convertir las coordenadas y alturas del trazado de GMS.d y msnm respectivamente a coordenadas relativas al MBP, para esta operación se puede utilizar cualquier SIG. Una vez que se tiene integrada la base de datos del trazado en la base del levantamiento que realiza la pantalla, es posible

usarlos como puntos de control (**BM**) dentro de la pantalla FMX, por lo que previamente se debe definir **las nuevas alturas** en cada punto de acuerdo con la profundidad de las capas compactadas. Es importante definir que el concepto de nuevas alturas está indicado por la altitud registrada en un punto de muestreo por el sistema GPS+RTK más la sustracción o resta de la profundidad en metros de la localización de la capa compactada registrada en ese punto.

En este estudio las profundidades de las capas compactadas fueron simuladas y definidas en forma aleatoria para generar los BM del diseño. De tal forma, que los puntos con prescripción de 0.20m se le sumó 0.10 m partiendo de la referencia, a los puntos con prescripción de 0.30 m no se hizo modificación, mientras que a los puntos con prescripción de 0.40 m, se le restó 0.10 m.

En esta aplicación la nueva base de datos generada proporciona la posición de los 15 puntos de control respecto al punto maestro en coordenadas relativas dentro del sitio del levantamiento y visibles en la pantalla del controlador. Esta base debe estar con el mismo formato que utiliza el controlador y se caracteriza por tener seis columnas editadas y las filas son definidas: por el número de puntos de control, el punto maestro, los puntos registrados de acuerdo a la frecuencia de datos del recorrido del límite e interior. Posteriormente se procesa la base de datos en el simulador de la pantalla; en este paso se generan todos los archivos necesarios para cargarlos a la pantalla FmX.

Diseño del plano en FieldLevel II

Este proceso se realiza con el software de la aplicación FieldLevel II de la pantalla FmX, se selecciona Plano Nuevo y en la ventana de edición se configura la dirección de la pendiente principal por medio de dos puntos seleccionados de acuerdo a la dirección que tendrán los surcos, posteriormente se agregan los puntos de control BM que interceptan la dirección de la pendiente. Se puede observar la aceptación de los puntos intermedios por el sistema al mostrar en la columna de cortes y rellenos el valor de 0.0, lo que significa que en esos puntos el sistema desplazará la cuchilla a la altura definida en la columna Altura (Figura 8).

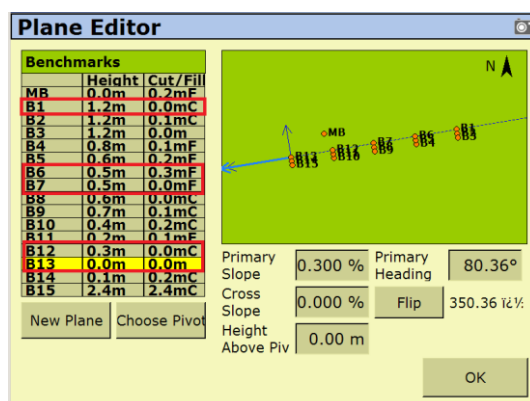


Figura 5. Ventana de aplicación Editor de Planos

Evaluación Dinámica

Se generaron dos prescripciones, la primera para comprobar si el sistema respondía al mapa de prescripción definido por los puntos de control editados de acuerdo al manual de la metodología propuesta; el segundo mapa se hizo con la intención de corroborar la respuesta debido a los puntos de control. Las características de los dos mapas y la respuesta del sistema a éstos, se describen a continuación:

Primera aproximación de prescripción. En el primer mapa se definió la dirección de la pendiente que va del BM13 al BM1, dirección en la que se realizarán los recorridos, por otra parte se agregan los puntos intermedios del recorrido al diseño (BM1, BM6, BM7, BM12 y BM13) (Figura 9). Es importante señalar que el recorrido es una franja que está determinada por el ancho de trabajo del implemento y la longitud del sitio.

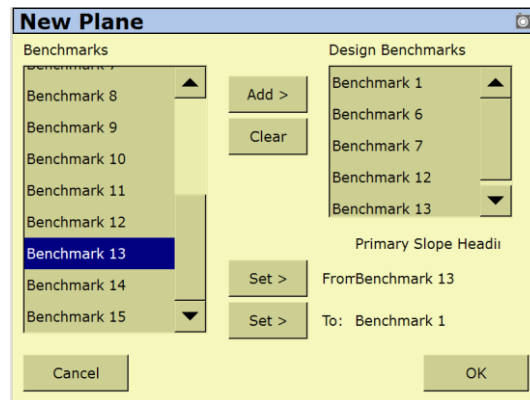


Figura 6. Diseño de un nuevo plano.

Las alturas de la primera prescripción se muestran en la Tabla 1. En la columna Altura se muestra la distancia entre el MBP y el punto de control; la columna Profundidad contiene la distancia entre el punto de control y la capa compactada en distancias de 0.2, 0.3 y 0.4 m, definidas de forma aleatoria para este estudio; en un trabajo real, se definirán de acuerdo a un diagnóstico de localización de capas compactadas; la columna ajuste indica la cantidad a sumar a la columna de Altura y así generar la última columna que contiene las nuevas alturas que sirven de control al realizar el diseño en la pantalla FmX.

La Figura 10 corresponde al recorrido del BM13 al BM1 a la respuesta del sistema en tiempo real y medida con el sensor de distancia.



Figura 7. Comportamiento del sistema de control en tiempo real.

En el segundo mapa la dirección fue en base a los mismos puntos (BM13 y BM1) pero solo se tomaron en cuenta los puntos de diseño BM13, BM12, BM6 y BM7 porque al incluir el BM1 como punto de diseño, se modificaron las demás alturas de control, debido a esto no se consideró el BM1 en el nuevo diseño. Este mapa de prescripción fue generado para el mismo lote, realizando un nuevo levantamiento y todas las operaciones para la edición de prescripción indicadas en el manual para generar los puntos de control (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros de la prescripción 2

Punto de Control	Altura	Profundidad	Ajuste	Prescripción
BM1	1.31	-0.2	0.10	1.41
BM2	1.33	-0.3	0.00	1.33
BM3	1.17	-0.4	-0.10	1.07
BM4	0.76	-0.2	0.10	0.86
BM5	0.75	-0.2	0.10	0.85
BM6	0.73	-0.3	0.00	0.73
BM7	0.67	-0.4	-0.10	0.57
BM8	0.68	-0.4	-0.10	0.58
BM9	0.68	-0.3	0.00	0.68
BM10	0.41	-0.4	-0.10	0.31
BM11	0.40	-0.3	0.00	0.40
BM12	0.35	-0.2	0.10	0.45
BM13	0.21	-0.3	0.00	0.21
BM14	0.24	-0.4	-0.10	0.14
BM15	0.25	-0.2	0.10	0.35

La respuesta del sistema a la segunda prescripción se muestra en la Figura 11

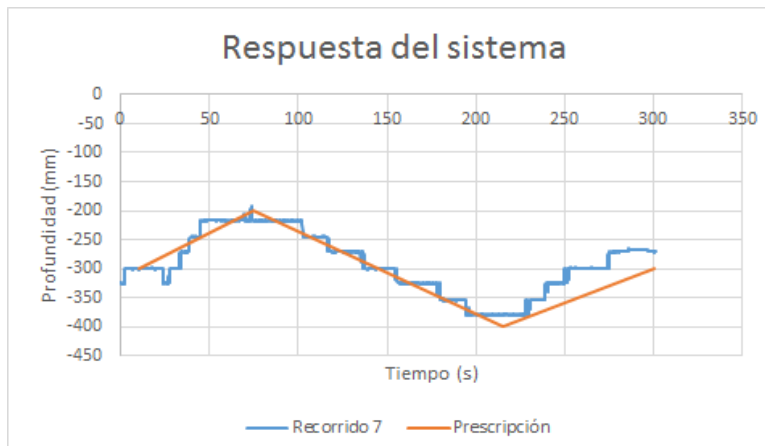


Figura 8. Comportamiento del sistema a la segunda prescripción.

DISCUSIÓN

Fulton *et al.* (2005), Shearer *et al.* (2002), Cugati *et al.* (2006) y Bennur (2009) realizaron pruebas estáticas y dinámicas de sistemas de control utilizados en la aplicación de tecnología de tasa variable.

En las evaluaciones estáticas se observó que existe una mayor demora en la respuesta del sistema de control cuando la dirección de la prescripción es hacia abajo. Anglund y Ayer (2002) encontraron demoras de 2 s por el uso de GPS y por el retraso de la válvula de control. Yang (2000) observó una demora de 1 s cuando una tasa cambió y se mantuvo constante durante 4 s, con independencia de si la tasa estaba cambiando en la dirección hacia arriba o hacia abajo. Todas las pruebas indican que el controlador de la respuesta del retardo de tiempo dinámico fue de alrededor de 1 s.

Se utilizaron dos prescripciones generadas partir de un plano de diseño utilizando los puntos de control por franjas. En la primera prescripción, se realizó un recorrido en las áreas interpoladas obteniendo una primera aproximación con una respuesta aceptable del sistema de control. Esto puede deberse posiblemente al cambio de alturas relativas entre el BMP y la

superficie interpolada. Para la segunda prescripción el recorrido se realizó sobre los puntos muestreados, obteniendo una segunda aproximación con una mejor calidad de respuesta del sistema de control en los registros obtenidos por el sensor de distancia. Resultados similares fueron reportados por Yang (2000) quien observó que el retraso en la colocación del GPS tenía un efecto en la precisión de aplicación en el caso de un mapa basado en la aplicación de tasa variable prescrito.

CONCLUSIONES

El prototipo articulado de arado de cinceles permitió la aplicación de labranza variable con un rango de desplazamiento de 0.20, 0.30 y 0.40 m, mediante la manipulación del sistema electrohidráulico a una señal emitida por el controlador Fmx.

El sensor de distancia verificó en tiempo real los desplazamientos hacia arriba y hacia abajo de la sección articulada con respecto a la fija con una confiabilidad del 99.6%

Se obtuvo un manual que describe el procedimiento para la aplicación de labranza profunda variable inteligente utilizando el controlador FmX y la facilidad Survey y FieldLevel II.

El sistema de control ha sido capaz de aplicar el laboreo profundo de forma variable e inteligente

Para la aplicación de labranza variable es necesario diseñar un plano el cual se aplica particularmente en una franja definida por los puntos de control empleados para hacer el diseño del plano.

LITERATURA CITADA

- Andrade-Sanchez, P., S.K. Upadhyaya, C.Plouffe and B. Poutre 2008. Development and field evaluations of a field-ready soil compaction profile sensor for real-time applications. Transactions of ASABE 24(6):743-750.
- Anglund, E.A., P.D. Ayers. 2003. Field evaluation of response times for a variable rate (pressure based and injection) liquid chemical applicator. ASAE Paper Number: 001157. St. Joseph, Mich.: ASABE.
- Bennur J. P. 2009. Response time evaluation of real-time sensor based variable rate technology equipment. Candidate for the Degree of Master of Science in Bio-Systems & Agricultural Engineering at Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma in July, 2009.
- Chang, J., Clay, D.E., Carlson, C.G., Clay, S.A., Reese, C.L., 2000. The influence of different approaches for identifying inorganic N and P management zones on fertilizer recommendation. Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture (CD), July 16_/19, 2000. Bloomington, MN, USA.
- Cugati, S.A., W.M. Miller, J.K. Schueller, A.W. Schumann, S.M. Buchanon, H. K. Hostler. 2006. Benchmarking the dynamic performance of two commercial variable-rate controllers and components. Transactions of the ASABE. 50(3): 795–802.
- Doerge, T., 1998. Defineing management zones for precision farming. Crop Insights 8, 21.
- Drummond, P.E., Christy, C.D., Lund, E.D., 2000. Using an automated penetrometer and soil EC probe to characterize the rooting zone. Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture (CD), July 16_/19, 2000. Bloomington, MN, USA.

- Evans, R.G., Han, S. & Kroeger, M. W. 1995. Spatial distribution and uniformity evaluations for chemigation with center pivots. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 38: 85-92.
- Fulton, J.P., S.A. Shearer, S.F. Higgins, M.J. Darr, T.S. Stombaugh. 2005. Rate response assessment from various granular VRT applicators. *Transactions of the ASAE*. 48(6): 2095–2103
- Goddard, T., 1997. What is precision farming. *Proceedings of Precision Farming Conference*, January 20 _/21. Taber, Alberta, Canadá.
- Gonçalves, A. C. A., Folegatti, M. V. & Mata, J. D. V. 2001. Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. *Acta Scientiarum*, 23 (5): 1149-1157.
- Gorucu, S., A. Khalilian, Y. J. Han, R. B. Dodd, F. J. Wolak, and M. Keskin. 2001. Variable depth tillage based on geo-referenced soil compaction data in coastal plain region of South Carolina. ASAE Paper No.01-1016, ASAE, 2950 St. Joseph, Michigan 49085-9659.
- Khalilian, A., Y. J. Han, R.B. Dodd, J. Mice, S. Sullivan and M. Keskin 2002. A control system for variable depth tillage. ASAE paper No. 021209. St. Joseph, Michigan, USA.
- Misra, P. and Enge, P. (2006). *Global position systems: Signals, measurements and performance* (2nd ed.). Lincoln, MA, USA: Ganga-Jamuna Press.
- Nishiwaki K., K. Amaha and R. Otani. 2004. Development of positioning system for precision sprayer. *Automation Technology for Off-Road Equipment*, Proceedings of the 7-8 October Conference, Kyoto, Japan. ASAE Publication No. : 701P1004.
- Pena-Yewtukhiw, E.M., Grove, J.H., Beck, E.G., 2000. Nonparametric geostatistics/probabilistic sourcing of nitrate to a contaminated well. *Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture (CD)*, July 16_/19, 2000. Bloomington, MN, USA.

- Shearer, S.A., T.S. Stombaugh, J.P. Fulton and T.G. Mueller. 2002. Considerations for development of variable-rate controller test standard. ASAE Paper Number: 021191, Chicago, IL.
- Werner, A., Doelling, S., Jarfe, A., Kuhn, J., Pauly, S., Roth, R., 2000. Deriving maps of yield-potentials through the use of crop growth models, site information and remote sensing. Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture (CD), July 16_/19, 2000. Bloomington, MN, USA.
- Yang, C. 2000. A variable rate applicator for controlling rates of two liquid fertilizers. *Applied Engineering in Agriculture*. 17(3): 409–417.
- Zhang, N., Taylor, R., Schrock, M., Staggenborg, S., 1999. Applications of a field-level geographic information system (FIS) in decision making for precision agriculture. ASAE paper No. 99-3046, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, USA.

4.5 Productos de la Fase V (Labranza Vertical)

Se realizó investigación básica y se obtuvo como resultado: La información y el conocimiento del efecto que se produce debido al acoplamiento con rotulas y al cambio de magnitud del brazo de palanca o profundidad de trabajo, en el monitoreo de las fuerzas de reacción del suelo en la evaluación de implementos de labranza cuando se utilizan marcos o estructuras posicionados entre el enganche del tercer punto y el implemento a evaluar bajo condiciones de laboratorio y campo. Por otra parte se está determinando el consumo de energía por unidad de superficie (MJha-1) En la aplicación variable de labranza vertical profunda.

En la quinta fase se generaron:

Artículo científico indexado en la Revista Nacional TERRA LATINOAMERICANA

Reynolds- Chávez, M.A., S. G. Campos-Magaña, M. Cadena-Zapata, J. A. López-López., N. Cuervo-Piña. 2014. Desarrollo de un sistema integral de medición de fuerzas para la evaluación de implementos de labranza.

Participación: Autor Estatus: artículo en revisión con carta de recibido

Artículo científico indexado en la Revista internacional CIGR JOURNAL

Reynolds- Chávez, M.A., S. G. Campos-Magaña, M. Cadena-Zapata, J. A. López-López., N. Cuervo-Piña. 2014 Vertical tillage parameters to optimize energy consumption.

Participación: Autor Estatus: artículo en revisión con carta de recibido

4.5.1. ARTICULO CIENTÍFICO IV- *Desarrollo de un Sistema Integral de Medición de fuerzas para la Evaluación de implementos de labranza.*

DESARROLLO DE UN SISTEMA INTEGRAL DE MEDICION DE FUERZAS PARA LA EVALUACIÓN DE IMPLEMENTOS DE LABRANZA

Development of a Force Sensing Integral System for Tillage Implement Assessment.

⁽¹⁾ Reynolds-Chávez, M. A., ⁽²⁾ S.G. Campos- Magaña, ⁽²⁾ M. Cadena-Zapata, ⁽¹⁾ J.A.

López-López, ⁽¹⁾ N. Cuervo-Piña ⁽¹⁾, ⁽²⁾ G. Ramírez- Fuentes

⁽¹⁾Estudiante de posgrado en Ingeniería en Sistemas de Producción de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 25315 Saltillo, Coahuila, México. ⁽²⁾ Profesor investigador de la división de ingeniería UAAAN. ‡ Autor para correspondencia (camposmsg@hotmail.com).

RESUMEN

Un sistema de medición integral de fuerzas de reacción del suelo fue desarrollado para evaluar el funcionamiento en implementos de labranza. El equipo está conformado por tres transductores Octagonales de Anillo Extendido (OAE) y una estructura flotante acoplada entre el enganche del tractor y el implemento a evaluar. El presente trabajo incluye además del desarrollo, la evaluación en laboratorio y su verificación en campo del efecto de la posición de un cincel con diferentes anchos y profundidades de trabajo y su forma de acoplamiento. Los resultados de calibración presentaron una correlación del 99.9 % y una constante de ecuación promedio de $15.33 \pm 2\%$ entre transductores, garantizando alta confiabilidad y precisión de las mediciones de fuerzas. Al realizar evaluaciones estáticas simulando fuerzas horizontales en un cincel a diferentes anchos y profundidades de la

herramienta, se encontró que la constante de la ecuación de los transductores obtenidas en la calibración, disminuyen en forma lineal cuando se aumenta la profundidad de trabajo, esto debido a un efecto de momento ocasionado por el acoplamiento con rotulas en la estructura flotante, situación diferente para el cincel con acoplamiento empotrado al marco del implemento, la cual no se vio afectada por el cambio de posición de la fuerza. En las evaluaciones bajo condiciones de campo, las fuerzas horizontales obtenidas en los transductores del sistema integral fueron contrastadas con los acoplados directamente al implemento articulado. Los resultados muestran que existe un efecto de la distribución de los (OAE) que sobreestima y subestima los valores de la fuerza en un 5 y 10 % en la estructura integral con respecto a la fuerza real obtenida directamente en la herramienta cuando se cambia la profundidad de trabajo de 0.20m a 0.30 y 0.40 m , respectivamente. Se concluye que es necesario determinar las constantes de los (OAE) calibrando la herramienta a la profundidad de trabajo requerida en campo.

***Palabras clave:** evaluación de implementos, calibración de transductores y labranza vertical.*

SUMMARY

An integrated monitoring system of soil reaction forces was developed to assess the performance of mounted tillage implements. The equipment consists of three Octagonal Extended Ring transducers (OER) and a floating structure coupled between the third point hitch of the tractor and the implement to be evaluated. The purpose of this study was the laboratory evaluation and field verification of the effect of the position of a chisel with

different working widths and depths and coupling system. Calibration results obtained in the laboratory showed a correlation of 99.9% and average constant equation of $15.33 \pm 2\%$ between transducers ensuring, high reliability and accuracy of the sensors. When performing static tests simulating horizontal forces at chisel plough to different widths and depths of the tool, it was found that the constant equation transducer obtained during calibration, decreases linearly when the depth is increased, this due to an effect moment caused by the coupling with ball joints on the floating structure, different situation for the chisel with attached coupling to the frame of the implement, which was not affected. The horizontal forces obtained in the transducers of integral system under field conditions were contrasted with directly coupled to the implement articulated. The results shows that an effect exists of the distribution of the (OER) that underestimates and overestimates the force values at 5 and 10% in the integrated structure with respect to the real force obtained directly with the tool when the working depth was changed from 0.20 m to 0.30 and 0.40 m, respectively. It can be concluded that it is necessary to determine the constants of (OER) calibrating the tool at the required working depth.

Index words: *assessment tools, transducer calibration and vertical tillage.*

INTRODUCCIÓN

Conocer la demanda de fuerza total para calcular la potencia del tractor no es suficiente, actualmente se requiere también precisar la magnitud y dirección real de las fuerzas de reacción del suelo y su interacción con el implemento en condiciones de operación,

específicamente cuando se modifican los anchos y profundidades de trabajo de la herramienta.

Actualmente la medición de las fuerzas en herramientas de labranza se realiza con dinamómetros de tipo axial para implementos remolcados y los transductores tipo enganche, acoplados a los tres puntos del tractor, son utilizados para implementos montados (Khan *et al.*, 2006). Lickso y Harrison (1988). Campos y Wills (1995) describieron la necesidad de un sistema de alta velocidad de muestreo para la reproducción de las fuerzas de reacción del suelo que incluyen transductores de fuerza, un acondicionador de señal y convertidor analógico digital, el sistema anterior permite reproducir en términos de energía, lo que está sucediendo en la interacción suelo-herramienta.

Los transductores desarrollados hasta la actualidad para la medición de las fuerzas en implementos, se pueden dividir en dos: Transductor Octagonal de Anillo por Bandy (1986) y Dinamómetro axial (Campos y Wills, 1995). Kirisci *et al.* (1993) dividieron los dinamómetros de tiro en dos grupos, el de tipo marco y el tipo enganche. Un dinamómetro de marco consiste en un transductor montado en una estructura especialmente construida que se inserta entre el tractor y la máquina. Thompson y Shinner, (1989) señalan que un dinamómetro de tipo enganche tiene los transductores de fuerza contruidos en el enganche unidos así mismo, la principal ventaja del tipo enganche sobre el tipo marco, es que la posición relativa del implemento con respecto al tractor no se altera, los de tipo enganche son más adecuados para los estudios en campo en la interacción tractor –implemento; esto debido a la geometría del enganche y en consecuencia en la transferencia de peso; la posición relativa del implemento con respecto a la superficie del suelo no se ve alterada por la presencia del

dinamómetro. En la actualidad los transductores octagonales de anillo son los más comúnmente usados (Khan *et al.*, 2007). Varios investigadores han hecho esfuerzos para estudiar sobre el desarrollo, construcción, calibración y evaluación de dinamómetros o transductores para el monitoreo de fuerzas de reacción del suelo y su efecto en la dualidad tractor –implemento (McLauling, 1996; McLauling *et al.*, 2005 y Chen *et al.*, 2006).

Godwin *et al.* (1993) diseñaron un dinamómetro tri-axial usando dos Octagonales de Anillo Extendido (OAE) para medir las fuerzas y momentos ejercidos en herramientas de labranza, ellos reportaron una excelente linealidad entre el voltaje de salida y la carga aplicada y una sensibilidad cruzada menor al 4 %. Resultados similares fueron reportados por McLauling *et al.* (1998); Kheiralla *et al.* (2003); Khan *et al.* (2006), también reportaron que el efecto de histéresis entre las curvas de calibración para el incremento o decremento de las fuerzas coincidentes y perpendiculares aplicadas fue menor al 2 %. Chen (2006), mostró que la instalación correcta de galgas extensiométricas en los nodos de deformación horizontal y vertical puede alcanzar la mínima interacción entre fuerzas horizontales y verticales. Abbaspour *et al.* (2011) mencionan que las galgas extensiométricas fueron instaladas en el ángulo de 90° y 39.54° para mediciones independientes horizontales y verticales respectivamente. La sensibilidad cruzada de las fuerzas aplicadas en los puntos ortogonales de los puentes fue menor al 1 %.

En los artículos revisados y utilizados como referencia en esta investigación, a pesar de la alta linealidad de respuesta en los transductores, no se muestra el efecto del vector posición de la fuerza resultante de las magnitudes detectadas a un cambio de posición en la herramienta. Existen numerosas aportaciones del desarrollo, construcción, calibración de

transductores (OAE) para la evaluación tractor-implemento, pero no se cuenta con información precisa, enfocada en la predicción experimental y su verificación en campo de herramientas en labranza vertical. De forma común un transductor se calibra en laboratorio para generar una constante de ecuación obtenido de la regresión de calibración entre la salida de tensión del puente de wheastone y la carga aplicada en una única posición determinada, lo que afecta significativamente la resultante de las fuerzas de reacción del suelo obtenidas cuando existe un cambio de posición en la herramienta. El propósito del presente trabajo fue tanto el diseño del transductor como su evaluación en laboratorio y su verificación en campo del efecto de la posición de la fuerza de reacción del suelo para implementos de labranza a diferentes anchos y profundidades de trabajo y su forma de acoplamiento al tractor.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del sistema y su evaluación en implementos de labranza fue necesario dividirla en tres etapas: la primera fue el diseño y construcción del transductor integral, las restantes fueron la predicción de la magnitud de las fuerzas en laboratorio y su verificación en campo. La investigación se llevó a cabo durante el período de enero de 2010 a mayo de 2014 en el departamento de maquinaria agrícola y en la unidad experimental “Humberto Treviño Siller”, ambas instalaciones pertenecientes a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro ubicada en el Estado de Coahuila, México. Las pruebas en campo fueron desarrolladas en la unidad experimental con coordenadas $25^{\circ}01'50''N$, $100^{\circ}37'35''$ y 1884 m de altitud, en un suelo de textura franco arenoso con contenidos medios de 47.5% arena, 45% limo y 6.8% de arcilla y una humedad promedio del 12%.

El sistema integral de medición de fuerzas está conformado por un bastidor o estructura flotante (Figura 1), posicionado entre el enganche del tercer punto del tractor y el implemento a evaluar. Esta estructura permitió el acoplamiento de tres transductores del tipo de Anillo Octagonal Extendido (OAE), uno en cada punto del enganche para medir simultáneamente las fuerzas horizontales, verticales y la transferencia de peso del implemento. Los (OAE) tienen una capacidad de 80 kN cada uno; adicionalmente se tienen dos transductores (OAE) de la misma capacidad, que se acoplan directamente en la herramienta a evaluar para realizar la comparación de lo que se está monitoreando en el sistema integral contra lo que está registrando directamente la herramienta.

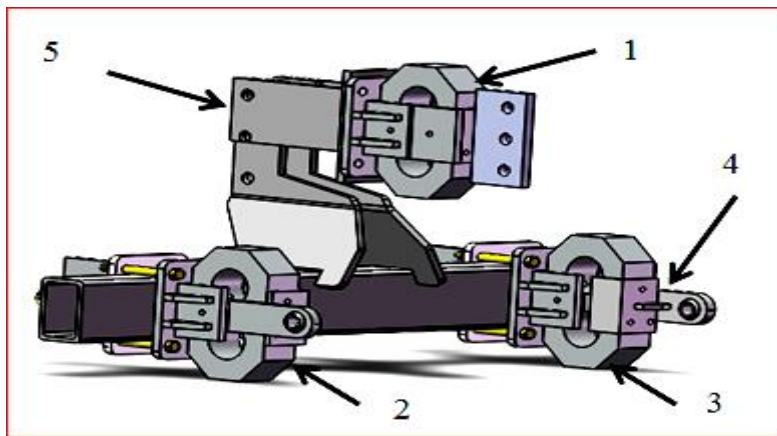


Figura1. Sistema integral de monitoreo. 1: transductor rojo; 2: transductor verde; 3: transductor amarillo; 4: acoplamiento con rotulas; 5: enganche categoría III.

Los (OAE) cuentan con galgas extensiométricas marca Kyowa tipo KFG-5-350-C1-11, para la determinación de las fuerzas en las direcciones horizontales, verticales y momentos. El diseño de los (OAE), la posición de las galgas y su conectividad (Figura 2), fueron realizados de acuerdo a la metodología descrita por Afzalinia y Roberge (2009).

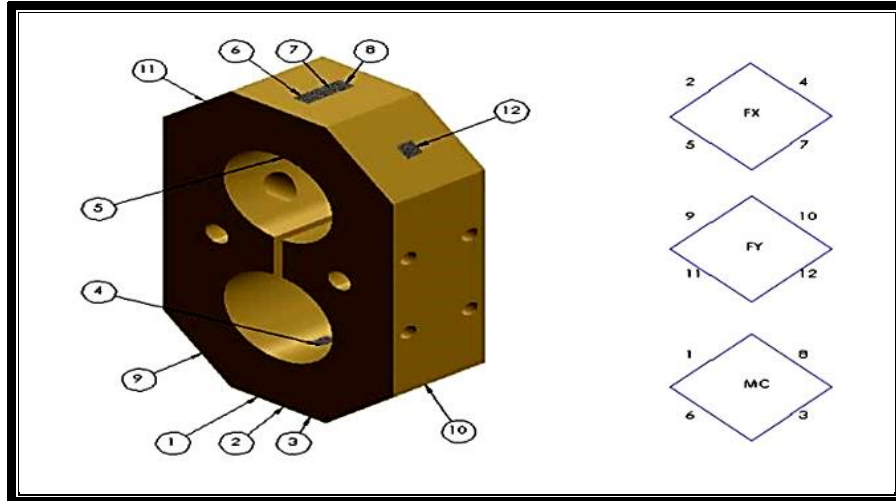


Figura2. Posicionamiento y conectividad de un transductor (OAE) Afzalnia y Roberge (2009).

Para el registro de información se utilizó un sistema integrado por un amplificador-acondicionador (**DBK-43A**) que consta de un módulo con 8 canales, con ganancias de 10x a 1250x (ϵ) fabricado por lotech, Inc; usado para amplificar la señal del transductor y proporcionar una salida estandarizada de voltaje y poder enviarla a un convertidor analógico-digital, además provee el voltaje de excitación al puente de Wheatstone transductor en un rango de 1-10 V y 100 mA. Un convertidor analógico-digital (**DaqBook 2000**). Este módulo convierte los valores de voltaje en valores digitales, está integrado por seis sub-módulos de voltaje diferencial, con una ganancia de 0.01-10V y con una velocidad de muestreo de 25-625 Hz, consta además de 16 canales analógicos y ocho canales digitales con rangos de ganancia en micro deformaciones de 100 a 10 K. El análisis de información de las fuerzas obtenidas fue realizado con el método de análisis espectral descrito por Campos y Wills (1995). El análisis e interpretación de resultados fue realizado con el programa estadístico de Minitab V15.

Evaluación en laboratorio

Con la finalidad de medir fuerzas en la dirección horizontal simultáneamente, de forma independiente y con alta precisión, fue necesaria la calibración estática individual de los cinco transductores utilizando un peso conocido y una posición de la herramienta para generar una regresión lineal y uniformizar las constantes. Para ello, se desarrolló un bastidor (Figura 3) el cual permite acoplar mediante rotulas un marco o chasis donde se coloca la estructura integral con los transductores acoplados, uno en cada punto del enganche, así mismo, este chasis permite el acoplamiento directo (empotrado) de la herramienta a evaluar, en este caso un cincel para labranza vertical. La posición utilizada del cincel empotrado al marco fue equidistante entre los (OAE) de los brazos inferiores del enganche y alineado entre centros con el (OAE) del tercer punto de la estructura flotante, con un brazo de palanca de 0.64 m, equivalente una profundidad de trabajo de 0.40 m. La distancia del brazo de palanca fue medida del centro del octagonal al punto de aplicación de la carga concentrada. Es importante señalar que en las pruebas en laboratorio solo se ocuparon los tres (OAE) fijos del sistema integral y un (OAE) con la herramienta acoplada. En la Figura 3 se muestra el módulo de evaluación construido para la calibración del sistema integral bajo condiciones de laboratorio y que está integrado por los siguientes componentes:

- 1.- Transductor rojo (1), ubicado en el punto superior de la estructura flotante. Este sensor midió la transferencia de peso ejercida por el implemento hacia el tractor.
- 2.- Transductor verde (2), ubicado en el brazo inferior izquierdo de la estructura flotante.
- 3.- Transductor amarillo (3), ubicado en el brazo inferior derecho de la estructura flotante.

Los sensores dos y tres están acoplados (**mediante rotulas**) a los brazos inferiores del enganche del tercer punto del tractor. Esta estructura se utilizó en laboratorio y campo.

4.- Transductor verde-azul (4), ubicado en la parte frontal del marco acoplado directamente al cincel.

5.- Transductor rojo-amarillo (5), ubicado en la parte trasera del marco articulado y acoplado al cincel.

Los sensores cuatro y cinco están acoplados (**empotrados**) al marco junto con la herramienta de prueba y solo detectaron las fuerzas en la dirección horizontal. Esta misma configuración de arreglos se utilizó en campo.

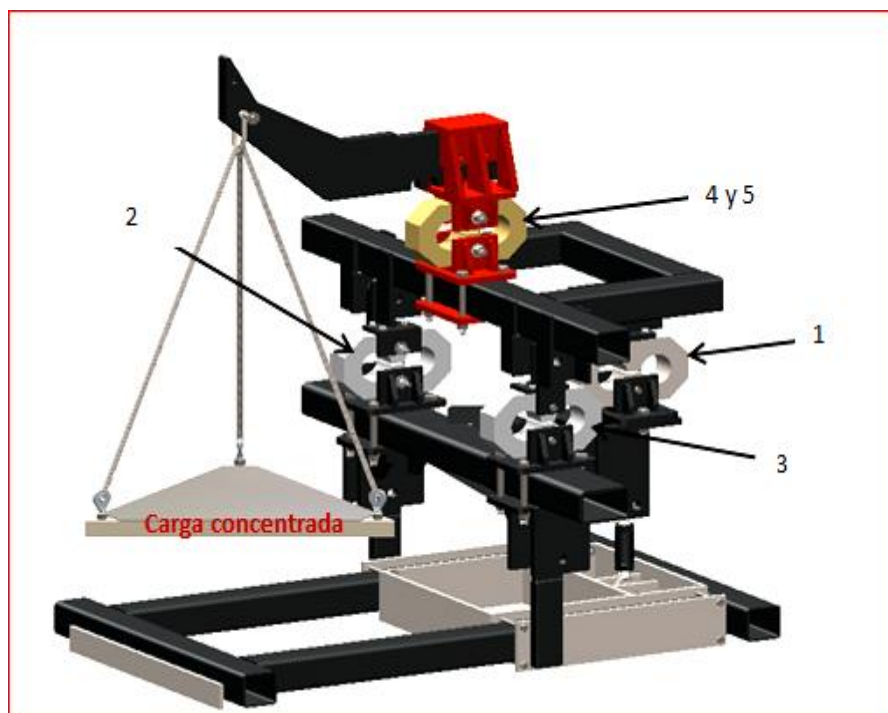


Figura 3. Sistema integral de sensores para evaluaciones en laboratorio.

Para la evaluación del efecto del cambio de posición en anchos y profundidades de trabajo, se determinaron las constantes para cada transductor evaluando cinco arreglos de posición del cincel con una misma carga concentrada y acoplado directamente al bastidor:

- 1) Tres brazos de palanca (0.54, 0.59 y 0.64 m), con posición equidistante de la carga entre el transductor (1) y (2).
- 2) Un brazo de palanca de 0.54 m, desplazando la carga del centro 0.18 m hacia la derecha (1).
- 3) Un brazo de palanca de 0.54 m, desplazando la carga del centro 0.18 m hacia la izquierda (2).

El diseño estadístico de prueba bajo condiciones de laboratorio fue un completamente al azar con seis repeticiones para cada arreglo en la determinación de las constantes para cada sensor. Los parámetros de prueba utilizados fueron un arado articulado de cincales tipo semi-recto, una carga concentrada de 347 kilogramos distribuidos en ocho pesos (48, 48, 48,73, 35, 35, 30 y 30 Kg), frecuencia de muestreo de 20 Hz con una total de 6800 datos por repetición.

Evaluación en campo

Para la evaluación en campo se emplearon los cinco transductores (OAE). Se utilizaron tres (OAE) en el sistema integral acoplado un transductor en cada uno de los puntos de la estructura flotante, posicionada entre el enganche del tractor y el implemento de evaluación para el **monitoreo de la fuerza de tiro del implemento** (Figura 4a). Los dos (OAE) restantes fueron acoplados en cincales individuales para contrastar el **monitoreo de la fuerza de tiro en la herramienta**, uno posicionado en la parte frontal (cincel somero) y el segundo en la parte trasera del bastidor (cincel profundo). Figuras 4b. La variable a evaluar fue la fuerza horizontal de forma independiente en cada componente de monitoreo, para contrastar el efecto del cambio de posición y el tipo de acoplamiento.



Figuras 4a. Posición de equipo integral 4b. Evaluación en campo de arado de cinceles con equipo integral.

Las evaluaciones se realizaron utilizando un arado de cinceles articulado para el laboreo variable, el cual constaba de tres cuerpos (dos cinceles someros a una profundidad constante de 0.20 m con un espaciamiento entre cuerpos de 0.56m y un cincel con alas y profundidad variable a 0.20, 0.30 y 0.40 m, posicionado al centro de los dos cinceles someros. El ajuste de la profundidad se realizó manualmente, utilizando una válvula electrohidráulica la cual manipulaba dos actuadores. El diseño experimental utilizado fue un bloques completamente al azar, con tres repeticiones y con un tamaño de parcela de 100 m por 2.40 m correspondiente al ancho del implemento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ajuste y calibración de sensores

Para obtener la misma precisión de medición en los cinco transductores, fue necesario uniformizar el coeficiente de constante por medio del ajuste de calibración en los cinco canales del amplificador que corresponden a cada sensor y ajustar la ganancia de entrada, el compensador y el voltaje de excitación. Los resultados de laboratorio muestran que no se encontró diferencia estadística significativa entre las constantes de calibración obtenidas (Cuadro 1). Estos ajustes fueron hechos con una misma carga concentrada de 4404 N y una sola distancia de prueba de 0.64 m, la cual simulaba la profundidad de trabajo de la herramienta considerando la proporción de variación entre constantes al momento de aplicar los ciclos de carga y descarga para cada transductor.

Cuadro 1. Ajustes de calibración para la generación de constantes.

Sensor	Canal	Compensador	Ganancia de entrada	Ajuste	Voltaje de excitación	Constante††	Prop.
-----No.-----				V		adimensional	%
† 1(TR)	0	-1.1	4.46	4.47	9.53	20.18b	-
2(TV)	4	0.01	4.52	4.54	9.6	15.18 a	100± 1
3(TA)	5	0.01	4.43	4.45	9.62	15.21 a	100
4(TVA)	3	0.46	4.4	4.4	9.47	15.30 a	100± 1
5(TRA)	2	-0.5	4.5	4.5	9.5	15.65 a	100± 2

† Sensor utilizado únicamente para la transferencia de peso del tractor al implemento. †† Valores seguidos por la misma letra son estadísticamente iguales, Tukey ($P \leq 0.05$).

Los resultados mostraron una linealidad del 99.9 % (Figura 5) entre la salida de voltaje del puente y la carga aplicada para cada sensor, con un porcentaje de histéresis menor del 2 %, efecto presentado solamente al momento de la descarga (Figura 6). Resultados similares fueron reportados por Godwin *et al.* (1993); McLaughlin *et al.* (1998); Khan *et al.* (2006). Las galgas o medidores de deformación fueron instaladas en los cinco transductores de acuerdo a lo descrito por Campos y Wills (1995) y Abbaspour *et al.* (2011) en el ángulo de 90° y 39.54° para mediciones horizontales y verticales independientes respectivamente, por lo que la sensibilidad cruzada pudo alcanzar la mínima interacción entre las fuerzas.

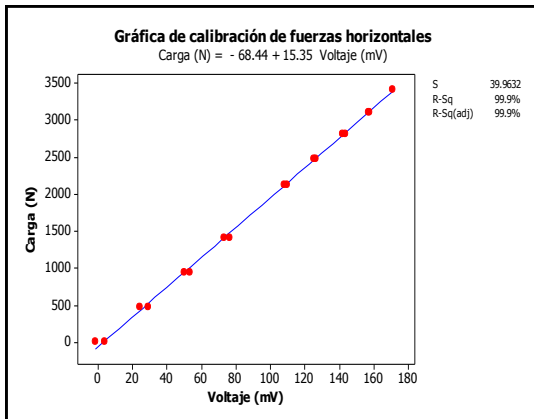


Figura 5. Linealidad en la calibración (OAE).

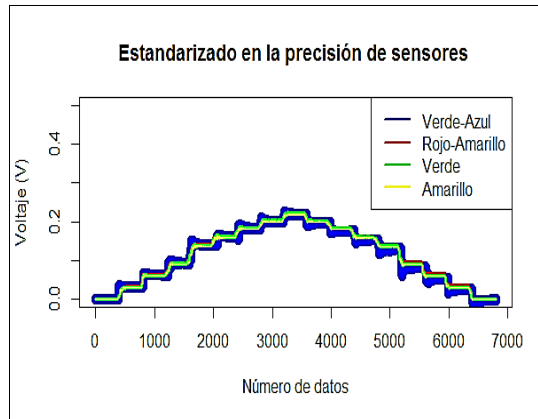


Figura 6. Ciclos de carga y descarga

En la determinación estática de la magnitud de las fuerzas de reacción del suelo en el cincel evaluado, los resultados revelaron que para los cinco arreglos de posicionamiento; los transductores (4 y 5) acoplados con la herramienta empotrada, no mostraron diferencias estadísticas significativas en las constantes obtenidas de la regresión lineal entre arreglos, al variar las posiciones equidistantes y desplazadas en las tres profundidades de trabajo.

Comportamiento diferente se presentó en la misma evaluación, al contrastarlo con los transductores (2 y 3) del sistema integral (Cuadro 2), los cuales presentan diferencia estadística significativa en los coeficientes de constante en las posiciones de 0.54 y 0.59 respecto a la posición de calibración de 0.64 m, al disminuir de manera lineal con respecto al incremento de la profundidad, efecto debido a la presencia de un momento generado por el acoplamiento en rotulas en la estructura integral. Este diferencial entre constantes debida a la profundidad, se presenta en igual proporción en las magnitudes de la carga aplicada y hace que se sobreestime o subestime en un 5 y 10 % respectivamente, con referencia a la posición de calibración en el sistema integral, en comparación a la magnitudes de las cargas aplicadas en el implemento.

Cuadro 2. Coeficiente de constantes en sensores a diferentes posiciones de la herramienta.

Posiciones de trabajo	Profundidad	C o n s t a n t e s OAE			Implemento (empotrado)	
		T2	T3	Integral (rotulas) Promedio (T2,T3)	T4	T5
	m	-----adimensional-----				
Equidistante	0.54	17.05	16.51	16.78 b	15.79 a	15.46 a
Equidistante	0.59	15.83	16.08	15.96 c	15.57 a	15.65 a
Equidistante	0.64	15.18	15.21	15.19d	15.3 a	15.65 a
Desplazado (1)	0.54	20.54	14.43	17.48 a	15.75 a	15.50 a
Desplazado (2)	0.54	13.95	21.75	17.85 a	15.81 a	15.43 a

† Valores seguidos por la misma letra son estadísticamente iguales, Tukey ($P \leq 0.05$). T2: transductor verde; T3: transductor amarillo; T4: transductor verde-azul; T5: transductor rojo-amarillo.

En la evaluación con los transductores con los desfazamiento (1 y 2) , los transductores (4 y 5) no se ven afectados, mientras que para los (OAE) (1 y 2) el desfazamiento al eje del centro del implemento se corrige determinando el promedio entre ambos transductores o

utilizando implementos simétricos. Para eliminar el error de proporción entre las magnitudes de las fuerzas del implemento y el sistema integral ocasionadas por el cambio de profundidad de la herramienta, fue necesario localizar donde se encontraba el punto de quiebre del brazo de palanca de la carga concentrada con respecto a la posición relativa de los (OAE) (1; 2 y 3), donde el punto de quiebre se localiza cuando las magnitudes de las fuerzas para los transductores (2, 3, 4 y 5) son iguales. Para ello se realizó una regresión lineal entre los coeficientes de constantes y la profundidad de trabajo (Figura 7), utilizando las tres distancias del brazo de palanca (0.54, 0.59 y 0.64 m) con sus respectivas constantes en cada uno de los (OAE).

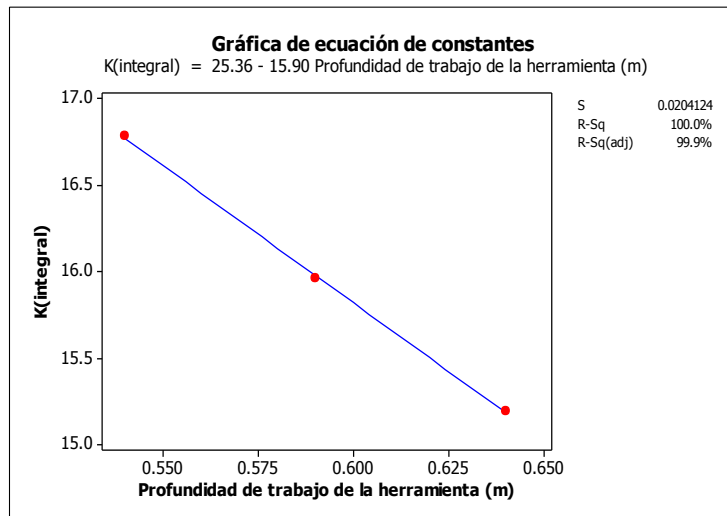


Figura 7. Ecuación de constante para la localización del punto de quiebre.

Los resultados mostraron una ecuación $K(\text{integral}) = 25.36 - 15.90 \text{ profundidad de trabajo de la herramienta (m)}$, dicha ecuación fue evaluada cada centímetro para los brazos de palanca a partir de 0.59 hasta 0.64 m, rango de distancia en donde se observa el cambio

de la condición de subestimado a sobreestimado (Cuadro 3). El punto de quiebre se localizó a la distancia de 0.63 m con un coeficiente de constante de 15.34, lo que significa que esta constante deberá ser sustituida en cada uno de los valores obtenidos de los (OAE) para cualquier brazo de palanca en la calibración estática, esto permitió igualar las magnitudes de las fuerzas entre los transductores del sistema integral con los transductores acoplados directamente en la herramienta.

Cuadro 3. Comparación de la proporción en coeficientes de constantes entre una distancia de calibración a 0.64m y el punto de quiebre.

Profundidad m	C o n s t a n t e s OAE						Proporción†	Condición
	Integral			Herramienta				
	T2	T3	Promedio (T2,T3)	T4	T5	Promedio (T4,T5)		
	-----adimensional-----							
0.54	17.05	16.51	16.78	15.79	15.46	15.625	1.07	Sobreestima
0.59	15.83	16.08	15.96	15.57	15.65	15.61	1.02	Sobreestima
0.64	15.18	15.21	15.19	15.3	15.65	15.475	0.98	Subestima
0.63	15.34	15.34	15.34	15.34	15.34	15.34	1.00	Igual

† Proporción obtenida de los coeficientes promedio de constante del sistema integral y la herramienta (T2+T3/ T4+T5).

Por otra parte, la posición relativa de los (OAE) con respecto al punto de aplicación de la fuerza debe permanecer al punto centro de los ejes de los (OAE) (1, 2 y 3). Para el caso donde exista un cambio de distancia del punto de aplicación de la fuerza deberá mantenerse la posición relativa mediante el ajuste de posición de los transductores, esto permitió determinar que el vector posición de la fuerza resultante se puede modificar e igualar cuando exista un cambio de posición en el brazo de palanca. En las evaluaciones realizadas bajo condiciones de campo se muestran los resultados de las magnitudes de las fuerzas horizontales obtenidas de la evaluación de un arado de cincales con arreglos de tres cuerpos

de cinceles (Cuadro 4), donde se observa que el sistema integral sobreestima para los brazos de palanca de 0.54 y 0.59 m, en 10 y 4 % respectivamente y subestima para el brazo de palanca de 0.64 m en 1%.

Cuadro 4. Comparación de fuerzas horizontales entre el sistema integral y el implemento articulado en tres diferentes arreglos bajo condiciones de campo.

Arreglo		Brazo palanca	Fuerza		Condición	Proporción
Somero	Profundo		integral†	implemento†		
----- m -----			----- N -----			
(2C) 0.20	(1C) 0.20	0.54	13082.79c	11870.28c	sobreestima	1:1.10
(2C) 0.20	(1C) 0.30	0.59	15689.61b	15069.73b	sobreestima	1:1.04
(2C) 0.20	(1C) 0.40	0.64	18802.72a	18929.77a	subestima	1:0.99

(2C): dos cinceles frontales; (1C): un cincel trasero. † Valores seguidos por letras diferentes muestran diferencias estadísticas significativas entre las magnitudes de las fuerzas registradas en el sistema integral y el implemento al efecto del cambio de profundidad, Tukey ($P \leq 0.05$).

Este comportamiento en la condición de sobre y subestimación de las magnitudes de las fuerzas monitoreadas por los sensores en el sistema integral se presentó de igual manera en la misma proporción en las evaluaciones de laboratorio, por lo que se verifica que existe un momento debido al acoplamiento con rotulas y al cambio de magnitud del brazo de palanca. Para la corrección de esta proporción se realizó nuevamente la localización del punto de quiebre utilizando las distancias del brazo de palanca y las bases de datos de las magnitudes; hallando el punto de quiebre a 0.63 m (Cuadro 5) y un coeficiente de constante de 15.34.

Cuadro 5. Localización del punto de punto quiebre a diferentes brazos de palanca de la herramienta utilizando la proporción de las magnitudes de las fuerzas.

Profundidad de trabajo m	Distancia del punto de quiebre (m)										
	0.54	0.55	0.56	0.57	0.58	0.59	0.60	0.61	0.62	0.63†	0.64
	----- Proporción -----										
0.2	1.10	1.09	1.08	1.07	1.06	1.05	1.04	1.03	1.02	1.00	1.00
0.3	1.09	1.08	1.07	1.06	1.05	1.04	1.03	1.02	1.01	1.00	0.99
0.4	1.10	1.09	1.08	1.07	1.05	1.04	1.03	1.02	1.01	1.00	0.99

† Distancia del punto de quiebre en donde se igualan las magnitudes de las fuerzas a las profundidades de trabajo de (0.20, 0.30 y 0.40 m.) y que verifican la igualdad de los dos componentes de monitoreo.

Una vez obtenido el coeficiente de constante, se aplica en cada uno de las magnitudes de las fuerzas de cada transductor del sistema integral. Se observa que los valores de fuerza (Cuadro 6) presentan valores iguales en proporción, con un error menor al 2 % entre el sistema integral de monitoreo y lo que ocurre directamente en el implemento.

Cuadro 6. Comparación de fuerzas horizontales entre el sistema integral y el implemento articulado utilizando el punto de quiebre en tres diferentes arreglos bajo condiciones de campo.

Arreglo		Brazo palanca	Fuerza		Condición	Proporción
Somero	Profundo		integral†	articulado†		
----- m -----			-----N-----			
(2C) 0.20	(1C) 0.20	0.63	11966c	11870c	equivalente	1:1.02
(2C) 0.20	(1C) 0.30	0.63	15086b	15069b	equivalente	1:1
(2C) 0.20	(1C) 0.40	0.63	18985a	18929a	equivalente	1:1

† Valores seguidos por letras diferentes muestran diferencias estadísticas significativas entre las magnitudes de las fuerzas debidas al efecto del cambio de profundidad, Tukey ($P \leq 0.05$).

En la Figura 8a, 9a y 10a se presentan las gráficas del comportamiento de las fuerzas monitoreadas en el sistema integral en comparación con el registro de los transductores

acoplados directamente en los cinceles utilizando los coeficientes de constante obtenidos a una distancia del brazo de palanca 0.64m , para el arreglo (2C201C20, 2C201C30 y 2C201C40), respectivamente. Para la Figura 8b, 9b y 10 b solamente cambia el coeficiente de constante hallado en el punto de quiebre.

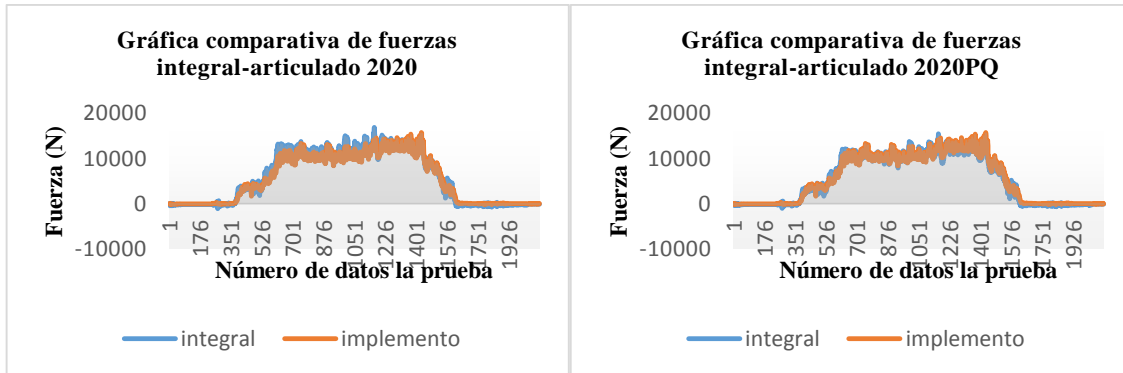


Figura 8a. Fuerzas Integral Vs Implemento calibradas a 0.64 m. Figura 8b. Fuerzas integral Vs Implemento ajustadas a la distancia del punto de quiebre.

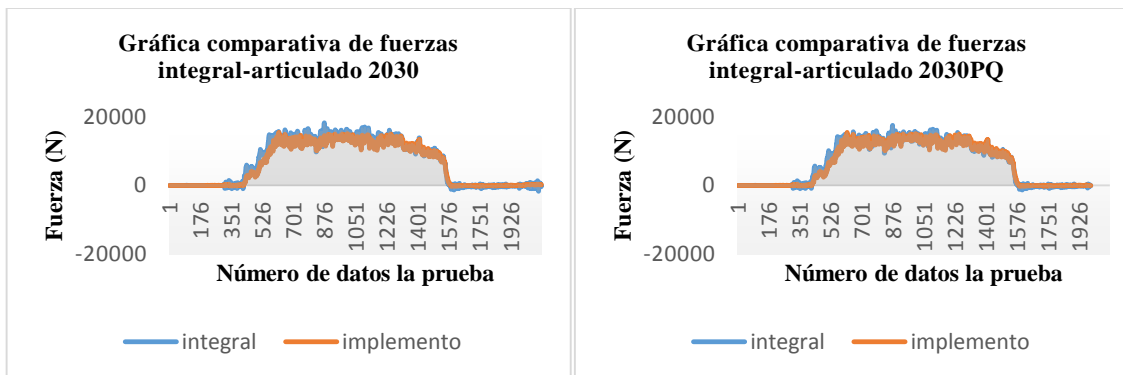


Figura 9a. Fuerzas Integral Vs Implemento calibradas a 0.64 m. Figura 9b. Fuerzas integral Vs Implemento ajustadas a la distancia del punto de quiebre.

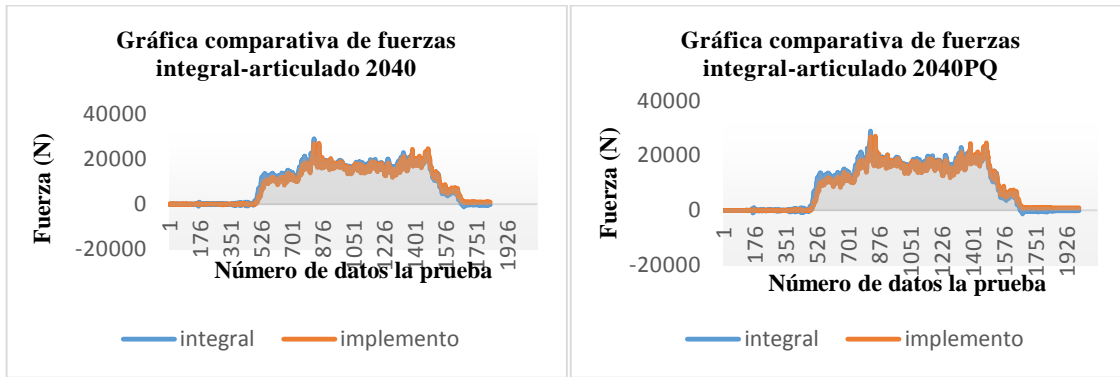


Figura 10a. Fuerzas Integral Vs Implemento calibradas a 0.64 m. Figura 10b. Fuerzas integral Vs Implemento ajustadas a la distancia del punto de quiebre.

Se puede observar que al utilizar los coeficientes de constante obtenidos del punto de quiebre en las tres figuras 8b, 9b y 10b, se logra igualar las magnitudes de las fuerzas monitoreadas tanto en el sistema integral como lo que ocurre directamente en el implemento, con un error menor del 2%.

Algunos artículos reportados por Godwin *et al.* (1993); McLauling *et al.* 2005; Chen *et al.* 2006; Kheiralla *et al.* (2003); Khan *et al.* (2006); Abbaspour *et al.* (2011) en desarrollos similares no reportan el efecto del brazo de palanca sobre las magnitudes detectadas por los sensores, lo cual indica que el análisis realizado bajo condiciones en laboratorio y en campo contribuyen a solventar el vacío que existe en los anteriores desarrollos, permitiendo tener una alta confiabilidad en el monitoreo de las fuerzas que actúan en un implemento de labranza vertical haciendo las consideraciones desarrolladas en el presente trabajo.

CONCLUSIONES

-Los transductores empleados para las mediciones de las fuerzas en el sistema integral y en el implemento, mostraron una correlación superior al 99% representando una alta confiabilidad en el funcionamiento de los sensores.

-El sistema integral de monitoreo detectó un efecto de momento debido al acoplamiento con rotulas entre la estructura flotante y el implemento, producto de las cargas y los brazos de palanca. A diferencia de los transductores individuales empotrados directamente al implemento los cuales no son sensibles a la posición de las fuerzas.

-En el sistema integral los coeficientes de constante obtenidos de la regresión de calibración entre la salida de tensión del puente y la carga aplicada para cada sensor, disminuyen en forma lineal con respecto al incremento de la profundidad de trabajo o brazo de palanca de la herramienta. Para un cambio de profundidad de trabajo en 0.10 m, la constante disminuye aproximadamente un 5 %, misma proporción sucede con la magnitud de las fuerzas.

-Se requiere calibrar en laboratorio el sistema integral de monitoreo con la profundidad de trabajo del implemento que se utilizará en campo, ya que por abajo o por encima de la distancia de calibración, la fuerza resultante subestima o sobreestima la magnitud de las fuerzas.

-El cálculo obtenido en laboratorio del punto de quiebre permite que las mediciones de las fuerzas de reacción del suelo, sean menores al 2 % en comparación con las magnitudes reales.

-La magnitud del cambio de estimación de la fuerza, es la resultante de las posiciones de los transductores (OAE) en el sistema integral y está dada por el brazo de palanca utilizado en la calibración, considerando como origen el centro del transductor integral en el plano X-Y.

LITERATURA CITADA

Abbaspour-Gilandeh, Y., S. Haghghat_Shishvan. 2011. Extended octagonal ring transducers for measurement of tractor implement forces. Приборы и Техника Эксперимента, 2011, № 1, с. 146–150.

Afzalnia, S. y M. Roberge. 2009. An extended octagonal ring transducer for the compression chamber of a large square baler. J. Agr. Sci.Tech 11:377-389.

Bandy, M. S. and Babacz, W. A. 1986. Measurement of three point hitch forces on agricultural tractors. The engineering resource for advanced mobility. SAE technical paper series 861255.

Campos-Magaña, S.G. and Wills, B.M.D. 1995. Force Measurement-recording and data analysis system for tillage tools. Agricultural mechanization in Asia, Africa and Latin America 24(4):13-17.

Chen, Y., McLaughlin, N.B., Tessier, S.2006. Double extended octagonal ring (DEOR) drawbar dynamometer. Soil & Tillage Research, 2006, vol. 93, pp. 462–471.

Godwin, R.J., Reynolds, A.J., O'Dogherty, M.J. and Al-Ghazal, A.A. (1993). A triaxial dynamometer for force and management measurement on tillage implements. Journal of Agricultural Engineering Research 55: 189-205.

Khan, J., Godwin, R.J., Kilgour, J. and Blackmore, B.S. (2006). Design and calibration of a direct mounted strain gauged lower links system for measurement of tractor-implement forces. ARPN Journal of Engineering and Applied Science 1(1): 22-25.

- Khan, J., Godwin, R. J., Kilgour, J. and Blackmore, B. S. 2007. Design and calibration of a bi-axial extended octagonal ring transducer system for the measurement of tractor-implement forces. *J. Eng. Appl. Sci.*, **2(1)**: 16-20.
- Kheiralla, A.F., Yahya, A., Zohadie, M. and Ishak, W. 2003. Design and development of a three-point auto hitch dynamometer for an agricultural tractor. *AJSTD*, 20(3 and 4): 271-288.
- Kirisci, V., Blackmore, B.S., Godwin, R.J. and Blake, J. (1993). Design and calibration of three different three-point linkage dynamometers. ASAE/CSAE Paper No. 93-1009. ASAE, St. Joseph, MI.
- Licsko, Z.J. and P.H. Harrison. 1998. Acquisition and processing of soil reaction forces on tillage tools, *Trans. ASAE* 3(1): 315-318.
- McLaughlin, N.B. (1996). Correction of an error in equations for extended ring transducers. *Transactions of ASAE* 39: 443-444.
- McLaughlin, N. B., Tessier, S. and Gilbert, A. 1998. Improved double extended octagonal ring drawbar transducer for 3-D measurement. *Can. Agric. Eng.*, **40**: 257-264.
- McLaughlin, N.B., Chen, Y. and Tessier, S. (2005). Effect of strain gage misalignment on cross sensitivity in extended ring transducers. *CSAE Paper 05-063*.CSAE, Winnipeg, MB, Canada.
- O'Dogherty, M. J. 1975. A Dynamometer to measure the forces on a sugar beet topping knife. *20*: 339-345.
- Thomson, N.P. and K.J. Shinnars. (1989). A portable instrumentation system for measuring draft and speed. *Applied Engineering in Agriculture* 5(2): 133-137.
- Zoerb, G.C., Musonda, N.G. and Kushwaha, R.I. (1983). A combined drawbar pins and force transducer. *Canadian Agricultural Engineering* 25: 157-161.

4.5.2. ARTICULO CIENTÍFICO V- *Vertical Tillage Parameters to Optimize Energy Consumption.*

Vertical deep tillage parameters to optimize energy consumption

Marco A. Reynolds Chávez¹, Santos G. Campos Magaña², Martín Cadena Zapata², Juan A.

López López¹ and Neftalí Cuervo Piña¹.

1 Post-graduate student, Division of Production System Engineering, Autonomous Agriculture Antonio Narro University (UAAAN). Antonio Narro Avenue No. 1723 Saltillo-25315, Coahuila, México. Tel.: 844 1226748 E-mail: muchachoc@hotmail.com

2 Professor-Researcher, Department of Agricultural Machinery Engineering, (UAAAN).

Abstract

Proper selection and the correct use of machinery in agriculture must be understood as a component of a process aimed more efficient resources or optimize production. The objective of this study was the assessment of arrangements chisels bodies with different settings of the most important operating parameters in order to optimize energy consumption for vertical deep tillage. After a rigorous review of the most representative scientific papers, the influence of four operating parameters that must be considered as work settings before applying depth plowing and allowed more efficient use of energy. These parameters were: 1) working depth based in the critical depth theory 2) position and spacing of chisels 3) number of bodies and 4) use wings or sweeps. Each parameter evaluated individually compared with vertical traditional systems represents a significant savings in energy demand. The field work was divided in five different groups of chisel arrangements such as: (two and four shallow leading tine) and (one and two depth winged) individual test, (two shallows leading tine and one depth winged) and (four shallows leading tine and two depth winged

chisel arrangements) integral test and the last combination were the traditional vertical tillage systems used as a reference. The experiment was performed using a chisel plow prototype allowing set the four operation parameters, a transducer extended octagonal ring to measure the draft forces (kN) and a profilometer to determine the cross-sectional area of soil disturbed (m^2) in terms of specific resistance of the soil (kNm^{-2}). The total energy consumption for disturbed soil area ($MJha^{-1}$) was determined using the method of area under the curve in Matlab program 1.2 V.

The results of individual and integral assessments showed a highly significant reduction in the specific resistance of the soil, due to the increase in the disturbed area by coupling of wings in deep chisels positioned behind it and the use of shallow ahead of deep chisels in the same operation. The best arrangement for vertical deep tillage was the treatment T13 (four shallows chisel at 20 cm and two deep winged at 30cm) when compare with the integral arrangements T15 (seven chisel at the same deep to 30 cm) can see that there are highly significant savings of 23.88% in the total energy consumed, 40% in power demand, and 38.68% in the soil specific resistance to a single non-significant increase in disturbed soil area of 7.35%, this due to the adjustment of four operating parameters, therefore it is recommended the use of six bodies arrangement with the parameters of chisels vertical tillage instead of seven bodies currently used in the traditional system.

Keywords: depth plowing, vertical tillage, chisel plow parameters, energy consumption.

1 Introduction

The demand of foods, fuel and energy resources continue to increase worldwide. The achievements in crop yields are not sufficient when compared with the high cost of energy; therefore, it is necessary to optimize the resources used in activities that require higher costs in agricultural production, such as soil tillage, that which is considered to be one of the biggest agriculture operations as it requires the most energy on the farm (Adewoyin and Ajav, 2013). In soil tillage operations a large consumption of energy is required as a fuel; this is a factor that may limit agricultural activity as it reduces the cost effectiveness of the production system (Kichler *et al.*, 2007); however, if technological changes are implemented appropriate systems food production, including conservation agriculture is estimated that up to 50 % can reduce the use of fossil energy by itself (Pimentel *et al.*, 2008).

Reduced or non-turning tillage not only conserves the time and energy, but also reduces the cost of cultivation, improves soil environment for better crop yield and increased water availability for plant growth (Shrivastava and Satyendra, 2011, Dutzi, 2008; Brunotte and Sommer, 2009). In this respect, vertical tillage is a better alternative of conservation system because even if may result in a small decrease of yield, energy saving is considerable (Cavalaris and Gemptos, 2002).

Energy savings using vertical tined tillage compared to conventional system have been documented in several studies (Hoogmoed and Derpsh, 1985; Cadena *et al.*, 2004; Camacho and Rodriguez, 2007a) .The force required for attachment and the quality of work depend on the specific resistance of the soil, working depth, soil density and moisture from it, at the time of the operation; spacing between bodies or chisels in combination with critical

depth work will result in different force requirements even in the same condition texture and soil moisture (Arvidson et al, 2004;. Raper and Bergtold, 2007; Manuwa, 2009).

For the above-mentioned it is important to know different operative parameters of tillage implements and their effect in the soil (Camacho and Rodriguez, 2007b). The draft required for a given implement will also be affected by the soil conditions and the geometry of the tillage implement (Taniguchi *et al.*, 1999; Naderloo *et al.*, 2009; Olatunji et al., 2009. Most of the research on draught in soil tillage has concerned forces on narrow tines (Arvidsson *et al.*, 2004).

Each tine has a useful working depth, below this depth also called the Critical Depth (**CD**), compaction may occur instead of loosening the soil and increasing the values of the specific resistance (Spoor and Godwin, 1978a). This depth is dependent upon tine geometry and soil conditions. Mckyes (1985) described that a critical depth exist for chisel performance, in which lateral soil removal occurs, and that this depends on the width of the implement and its rake angle, as well as the density and soil moisture content. Thus, ploughing depth depends on the crop to be cultivated, soil characteristics and also on the source of power available (Pandey, 2004). In addition to this, the fuel consumption rises proportionally with the depth of ploughing (Moitzi *et al.* 2006; Kalk and Hülsbergen, 1999). The effect of the rake angle or angle of attack, evaluated at the work (Payne and Tanner, 1959) and (Spoor and Godwin, 1978b), clearly show how increasing the horizontal and vertical force with increasing the rake angle. The rake angle for the chisels, measured at the tip of the chisel relative to the horizontal was 25° that represents for the lower specific resistance (Siemens et al., 1965), (Wildman *et al.*, 1978) (Magalhaes and Souza, 1990),

(Mathur and Pandey, 1992) and (Chaudhuri, 2001). Increase in soil disturbance, with lower specific resistance can be achieved by attaching wings or sweeps to the tines and through the use of shallow tines working ahead of the deep tines.

The shallow tines significantly reduce the force on the deep tine which indicates that loosening the soil surface by a separate operation prior to deep loosening offers an effective way of reducing the draught force on the deep tine. This could be particularly useful in circumstances where the tractive effort available is a limiting factor. The addition of shallow tines in the appropriate position ahead of a deep tine may reduce the total draught by approximately 10 %. Comparison of the draught values shows that the draught of the winged tines was only marginally greater than the conventional tine for a three-fold increase in total disturbance and hence a very significant reduction in specific resistance (Spoor and Godwin, 1978c). The influence of wing geometry and position on their performance is discussed together with the influence of tine spacing on loosening at depth and on the smoothness of the soil surface.

After a rigorous review of the most representative scientific papers, it was determined that the influence of four operating parameters that must be considered as work settings before applying deep plowing and allowed more efficient use of energy. These parameters were: 1) working depth based in the critical depth theory 2) position and spacing of chisels 3) number of bodies and 4) use wings or sweeps. Each of these parameters evaluated individually represents a significant savings in energy demand.

This work has the purpose to optimize the total energy demand through the integrated evaluation of these operating parameters in the specific resistance of the soil and to determine the arrangement that requires the least application of force per area of disturbed soil applying vertical deep tillage.

2 Materials and methods

2.1 Experimental location

The experiments were carried out during 2012 to the 2014 in the facilities at the experimental field station "Humberto Treviño Siller", belonging to the Agrarian Autonomous University Antonio Narro, located to the northwest of the state of Coahuila, Mexico with coordinated $25^{\circ}01'50.88''$ latitude and $100^{\circ}37'35.65''$ longitude, with an altitude of 1884 MSNM. The soil features test were a sandy clay loam soil contained 47.5% sand, 45% loam and 6.8 clay% and soil moisture of 12%. The total size of the experimental plot was three hectares divided into 15 arrangements with set four operating parameters with three replicates of 100 meters long by 2.5 meters width.

2.1 Equipment

For the field work evaluation an articulated chisel plow prototype with a dual platform attached by a parallelogram system was used to set the vertical tillage parameters, one fixed on the front for shallow chisels (two or four bodies) and the rear platform allowing moved with a hydraulic proportional valve upward and downward for deep winged chisel (one or two). The forward spacing between platforms was settled to 75 cm. Three extended octagonal ring transducers (EOR's) with individual capacity of 80 kN were coupled in a frame and positioned between the third point hitch of the tractor and the implement for the measurement of draft forces (**Figure 1**).



Figure 1 Articulated chisel plow prototype with coupled transducers frame

Chisels used in assessments (narrow tines) for both platforms were semi straight with a leg length of 75 cm, with tip size of 6 cm and a rake angle of 28 degrees. Furthermore wings or sweepers of 60 cm width were coupled only to the deep chisels. For data collect information an instrumented tractor (**Figure 2**) was used with a portable system of data acquisition of the type DaqBook 2000 together with a signal conditioner DBK-43A of the

IOTECH Company. To record the information of the draft forces a frequency of 20 data per second were used. For the spectral analysis of each of the replicates per array, the total data from the EOR's were taken in the same range of testing time. The tractor speed was 1.84 ms^{-1} .



Figure 2 Data acquisition systems for measurement soil reaction forces

2.3 Vertical deep tillage parameters

The parameters used in field experiments for the application of primary soil tillage were considered as follows:

For the **working depth**, the type and degree of soil disturbance is the prime factor when selecting tillage implements but this must be considered together with the draught and penetration force requirements for efficient operation. There are two major variables in the design and selection of the appropriate geometry for given tillage implements:

(i) Depth/widthratio(d/w) (1)

(ii) Rake angle (α) (2)

Three categories of such blades need to be distinguishing depending upon their depth/width (d/w) ratio (Godwin, 2007a).

1.-Wide tines (blades) for which $d/w < 0.5$, (3)

2.-Narrow (chisel) tines for which $1 < d/w < 6$, and (4)

3.-Very narrow (knife) tines for which $d/w > 6$. (5)

The **rake angle** is indicated by the angle at which the opener creates a horizontal line in the shift direction. The optimum rake angle is 25 degrees, due to increased mobilization of soil; whereas the increase of the angle increases proportionally draft force (Chaudhuri, 2001).

The **use of shallow chisels** significantly reduce the force on the deep chisel indicating that loosen the soil surface by a separate operation before deep loosening offers an effective way to reduce draft power on the deep chisel. To successfully operate this arrangement **position and spacing**, the shallow chisel must be close enough to the deep chisel.

Practical positions for the shallow chisels (Godwin, 2007b) are given:

Depth = $2/3$ x depth of the deep tine (6)

Lateral spacing = 2.5 x depth of the deep tine (7)

Forward spacing = ≥ 1.5 depth of the deep tine (8)

Godwin *et al.*, (1984) described how tine **spacing** can affect the soil disturbance pattern produced by a pair of tines operating at the same depth. The effect of this on the resulting draught force, area of disturbance and specific resistance, from this work and that

from studies on subsoiling equipment by Spoor and Godwin (1978d) the practical spacing recommended for good soil loosening are approximately:

(iii) 1.5 x depth of work for simple tines; (9)

(iv) 2.0 x depth of work for winged tines. (10)

Wings or sweeps attached to the foot of the tine modify the type of soil disturbance by doubling the disturbed area for an increase in draught force of 30 %. This significantly increases the effectiveness of the operation, by reducing the specific resistance (draught/disturbed area) by 30 % (Spoor and Godwin, 1978e).

The greatest advantage of **wings or sweep** is their ability to increase significantly soil disturbance in the deeper layers. The soil failure planes developing from the wing extremities tend to approach the vertical in direction rather than develop approximately 45° to the horizontal. This is due to a change in the configuring stress situation above the wings, caused by the loosening created by the leading subsoiler tip. The wing width selected will, however, depend upon strength, impact risk and overall draught considerations as well as specific resistance. Wings width of 0.7 -0.8 of the working depth have been used satisfactorily on many low impact risk soils at working depths between 0.3 and 0.45m.

2.4 Procedure

To perform field evaluation of the effect of the vertical tillage parameters in the specific resistance of the soil and the total energy consumed, the test methodology was divided into five blocks with a total of 15 arrangements, starting with the individual

assessment, integrals and the reference test, respectively. Setting parameters in each of the chisels arrangements described in Table 1.

Table 1 Parameters of vertical tillage operation

Position	Working depth	Number of bodies	Wings	Spacing between chisels
*Shallow	20 cm	2, 4	Unwinged	60 cm
*Deep	20 cm	1, 2	Without	120 cm
	20,30 and 40 cm	1, 2	With	120 cm

Note: * Shallow: one fixed working depth and spacing between chisel. * Deep: positioned at center between shallow chisels.

The individual evaluation concerns the arrangement configured only on the front(shallow leading chisels) or rear section(deep winged chisels) of the articulated chisel plow prototype and integrated evaluation, it refers to the arrangement set in the front and rear section. The baseline assessment is setup chisel plow used in traditional form.

To determine the specific resistance of soil employed in the primary vertical tillage, a set of 15 different tests were carried out with different chisel plough arrangements with the parameters above mentioned, three replicates for each test were performed, for practical purpose the tests were divided into five blocks (I, II, III, IV and V), like shown in **Table 2**.

Table 2 Field test arrangements at vertical tillage settings parameters.

Group	Treatment	*Arrangement	Description
I	1	1DC20UNW	A deep un-winged chisel to 0.20 m depth
-	-	-	-
-	2	1DC20W	A deep winged chisel to 0.20 m depth
-	-	-	-
-	3	1DC30W	A deep winged chisel to 0.30 m depth
-	-	-	-
-	4	1DC40W	A deep winged chisel to 0.40 m depth
-	-	-	-
-	5	2DC30W	Two deep winged chisels to 0.30 m depth
II	6	2SC20	Two shallow chisels to 0.20 m depth
-	-	-	-
-	7	4SC20	Four Shallows chisels to 0.20 m depth
III	8	2SC20 + 1DC20UNW	Two shallow to 0.20 m depth + A deep un-winged to 0.20 m depth
-	-	-	-
-	9	2SC20 + 1DC20W	Two shallow to 0.20 m depth + A deep winged to 0.20 m depth
-	-	-	-
IV	10	2SC20 + 1DC30W	Two shallow to 0.20 m depth + A deep winged to 0.30 m depth
-	-	-	-
-	11	2SC20 + 1DC40W	Two shallow to 0.20 m depth + A deep winged to 0.40 m depth
-	-	-	-
-	12	4SC20 + 2DC20W	Four shallow to 0.20 m depth + A deep winged to 0.20 m depth
-	-	-	-
-	13	4SC20 + 2DC30W	Four shallow to 0.20 m depth + A deep winged to 0.30 m depth
-	-	-	-
-	14	4SC20 + 2DC40W	Four shallow to 0.20 m depth + A deep winged to 0.40 m depth
V	15	7C30UNW	Seven un-winged chisel to the same depth 0.30 m

Note: * Arrangement: DC: deep chisel, UNW: unwinged, W: winged, SC: shallow chisel, 20, 30, 40: working depth.

In the group I (individual assets), arrangements of one deep winged chisel plough were analyzed with three working depth (20, 30 and 40 cm), comparing them with the arrangements of one un-winged chisel with only one working depth to 30 cm , as well , two deep winged to 30 cm was analyzed . **In the group II (individual assets)**, arrangements of two and four shallows chisels were analyzed; the shallows chisel do not use wings in all treatments and the working depth remains constant depth of 30 cm. **In the group III (integral assets)**, was a combination of the group I and II, with arrangements of two shallows and one deep winged chisel with three working depth (20, 30 and 40 cm), comparing them

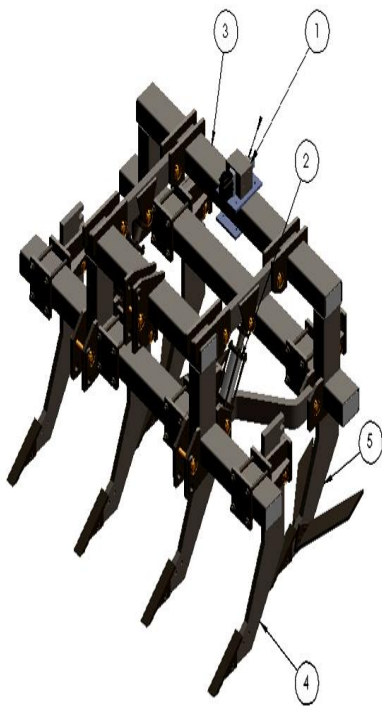
with the arrangement of two shallows and one deep unwinged chisel with only one working depth to 30 cm. **In the group IV (integral assets)** is a combination of the group I and II, with arrangements of four shallows and two winged chisel with three working depth (20, 30 and 40 cm), comparing them with the arrangement of four shallows and two deep unwinged chisel with only one working depth to 30 cm. **In the group V (references assets)** arrangement of a seven chisels (four front and three in rear position) were analyzed, do not use any wings and the working depth remains constant depth of 30 cm, the lateral spacing between chisel was set to 75 cm, this evaluation was realized with a commercial chisel plow equipment.

In each of the arrangements evaluated the magnitude of the total drag force in (N) was determined using the data obtained by the data logger and analyzed by the spectral method, described by (Campos and Wills, 1995). To determine the cross-sectional disturbed soil area (m^2) a profile meter with a graduate rule was used to measure the depth each 10 cm of the working width. Afterwards was determined the specific soil resistance ($Sr = F \cdot Ad^{-1}$) in Nm^{-2} . The total energy consumption for disturbed soil area ($MJha^{-1}$) was determined using the method of area under the curve in Matlab program 1.2 V described by (Pérez, 2002), for the statistical analysis a randomized complete blocks design was used. Likewise for the analysis and interpretation of the results, the statistical package of Minitab 15 was utilized.

3 Results and discussion

The Figures 3a (design-layout) and 3b (prototype) shows an example of six bodies arrangement tested under field conditions, there can be appreciated components and the apparatus frame.

1. Proportional valve for automatic depth adjustment
2. Hydraulic actuators for movement upward and downward of the articulated section.
3. Frame or articulated section for the variable depth application of primary tillage.
4. Shallow chisels
5. Deep winged chisels



Figures 3a (design-layout) and 3b (prototype) of articulated chisel plow for vertical tillage.

In Table 3 can be appreciated the results of individual (T1 vs T3) and integral assets (T8 vs T 10), where specific soil resistance decreased by 32 and 34.77 % respectively, due to increase in disturbed area by coupling of wings positioned behind the chisel, similar results on the reduction of the specific soil resistance were obtained by Spoor and Godwin (1978),

when they compared the use of a chisel plough with two different geometries of wings with a conventional chisel working to the same depth. Kumar and Thakur (2005) indicate that the specific resistance of soil could decrease up to 26.92% using straight winged chisels compared to conventional chisels working at a depth of 30cm in a clay loam soil.

In the assessment of (T2 vs T3 vs T4) of a winged chisel at three different depths, it was noted that for an increase in the working depth, the demand for draft power was greater; T4 was superior by 43 and 58% in T3 and T2, respectively. Sahu y Raheman (2006), they mention that the working depth has a greater influence on the specific resistance of the soil to increase the draft force.

Table 3 Test results arrangements with vertical tillage parameters for deep plowing

Treatment/ group	Arrangement	Chisel tines Draft force (kN)	Soil disturbance area (m ²)	Specific soil resistance (kNm ⁻²)	Consumed energy (MJ ha ⁻¹)
1/1	1DC30UNW	14.99abc	0.126d	121.10a	**
2/1	1DC20W	9.88c	Nq	Nq	**
3/1	1DC30W	13.65abc	0.171cd	82.40abc	**
4/1	1DC40W	23.94abc	Nq	Nq	**
5/1	2DC30W	34.91a	0.434abcd	80.67abc	**
6/2	2SC20	13.57abc	0.157d	86.86ab	**
7/2	4SC20	14.03abc	0.410abcd	34.25c	302.5e
8/3	2SC20+1DC30UNW	23.12abc	0.292abcd	70.77abc	Nq
9/3	2SC20+1DC20W	11.96bc	0.191cd	62.35bc	423.9de
10/3	2SC20+1DC30W	15.08abc	0.236abcd	63.76bc	514.8de
11/3	2SC20+1DC40W	18.98abc	0.268abcd	70.79abc	688.8cd
12/4	4SC20+2DC20W	20.41abc	0.590abc	36.62c	664.5cd
13/4	4SC20+2DC30W	19.88abc	0.630ab	32.10c	823.1bc
14/4	4SC20+2DC40W	33.04ab	0.640ab	49.48bc	1121.2a
15/5	4SC30+3DC30UNW	33.12ab	0.680a	52.35bc	1093.2ab

Note: Nq: variable was not quantified, **: energy consumption was quantified only in integral arrangements. In each column the means with different letter have significant difference (Tukey, ≤ 0.05).

In arrangements of three bodies of chisels for individual treatments (T6 + T3) compared to the integral treatment T10, the results show a highly significant statistical reduction of 44% in draft force, the same behavior was found in integral arrays of six bodies for individual treatments (T5 + T7) compared to the integral treatment T13, where the results show a highly significant reduction of 59% in demand for draft power, due in both cases to the pass of shallow chisels ahead of deep winged and set arrangement configuration of

vertical tillage parameters described in table 1. Spoor and Godwin (1978) they reported that the addition of wings to the tine foot subsoiler increased the draft force in approximately 30%. This increase is within the range of 15-30% found it for the same test tine under other soil conditions. For this increase occurred in draft power, the total soil disturbance has doubled giving a significant improvement in the specific resistance of the soil.

According to the results in Figure 4, can be observed the behavior of draft forces in the integral arrangements proposed of three (T10) and six bodies (T13) compared with the arrangement of seven bodies (T15) used as a reference for the traditional vertical tillage. The increase of draft force in T13 vs T10 is due to the increasing number of bodies and set configurations arrangements. On the other hand, there is a decrease of up to 40% on the draft force in T13 vs T15, this significant savings is due to the use of six bodies instead of seven, to the position and spacing of shallow chisels ahead of deep chisels, the use of wings and the working depth. Minimize draft power is not the main issue, reducing the magnitude of the specific resistance (draft power / disturbed area) is much more important, because it is a better indicator of the overall efficiency of tillage. (Godwin, 2007).

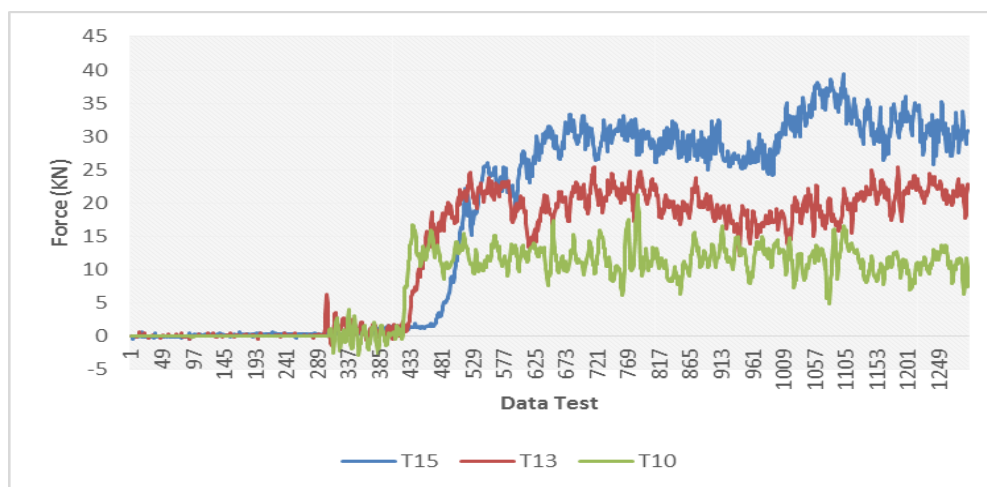


Figure 4 Comparison of draft force behavior with integral arrangements

Figure 5 Shows the effect on disturbed area with the use of different integral treatments (T10, T13 and T15), there can be appreciated that the best performance was found with T13, due to present very similar values to T15 but with a lower specific resistance of 38.68 % using four front shallows chisels working to a 20 cm depth followed for two winged chisel to 30 cm of depth in comparison with the reference of traditional vertical system; similar results were found by Camacho and Magalhaes (2004) where they show the effect of the use of winged subsoiler, compared to traditional chisel plough, for vertical tillage in the increment of soil disturbed area and the reduction of the specific soil resistance. Disturbed area values and corresponding draft power are shown in table 3

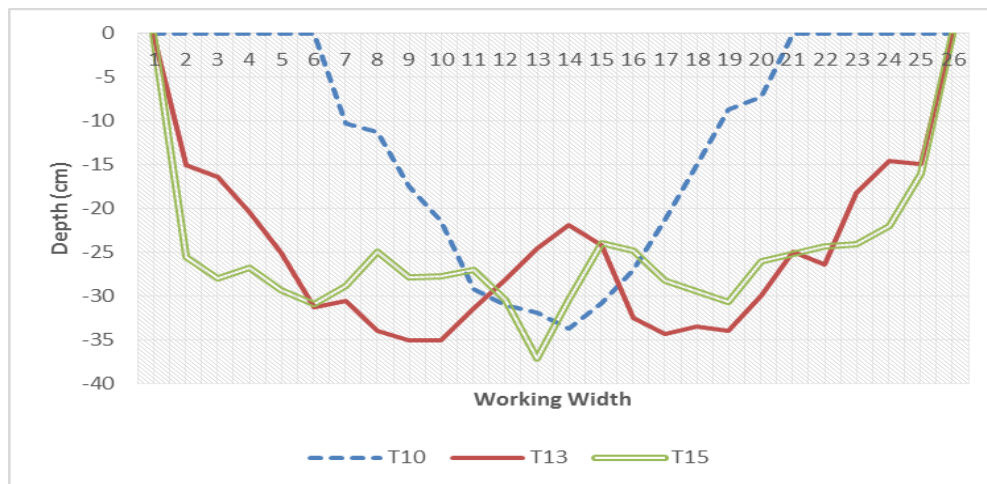


Figure 5 Comparison of soil disturbed area with three integral arrangements

In the Figure 6 show the behavior of the proposed settlement with six bodies chisels (T13), on which can be observed the energy consumed along the test surface, for this arrangement the total energy consumed was 823.1 MJ ha⁻¹, similar tendency was reported

by (Cadena, 2012) and (Hetz y Barrios, 1996) to evaluated chisels arrangements using three bodies with different positions and spacings and with and without wings.

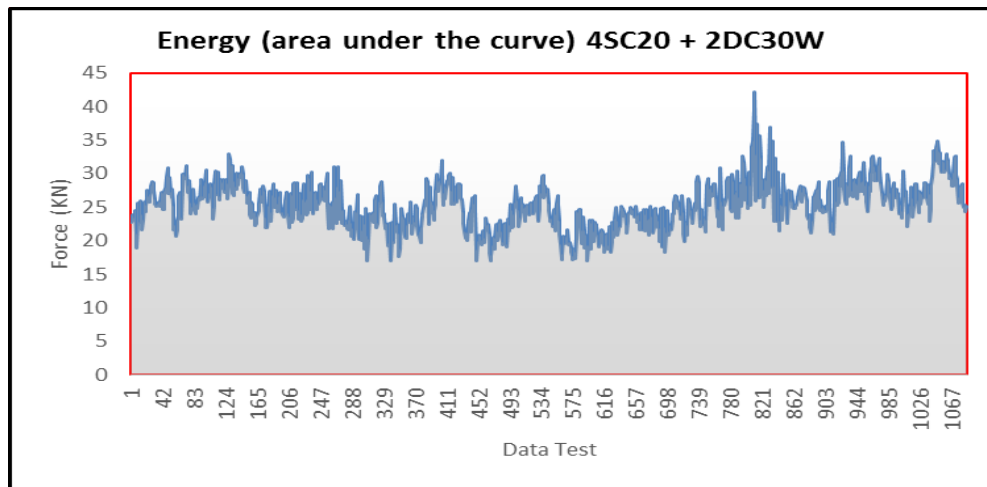


Figure 6 Energy consumption of proposed vertical tillage treatment (T13)

In Figure 7 shows the behavior of the traditional vertical systems settlement with seven bodies chisels (T15), on which can be observed the mean total energy consumed along the test surface, for this arrangement the total energy consumed was 1093.2 MJ ha⁻¹. It is important to indicated that the total area coverage obtained by under the curve method represents an accuracy alternative of quantify energy.

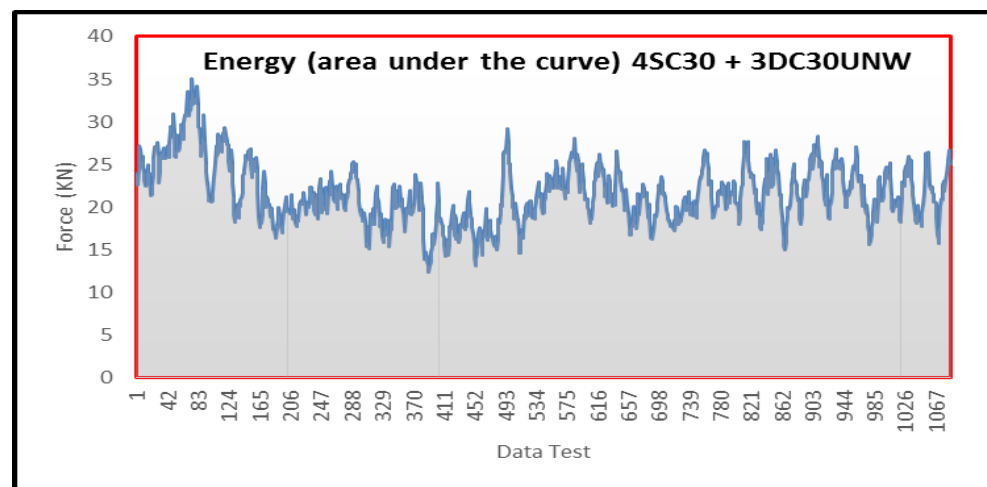


Figure 7 Energy consumption of traditional vertical tillage treatment (T15)

Finally and according to the results given in Table 3 can be observed the behavior of the integral proposed arrangements of six bodies chisels at three different working depths (20, 30 and 40 cm) in comparison with the traditional system of seven bodies to a single depth of 30 cm, used as reference in the traditional system of vertical deep tillage.

In the comparison of the integral arrangements T12 vs T15 can observe that there are highly significant savings of 39.21% in total energy consumption and 30% in the specific resistance of the soil.

In the comparison of the integral arrangements T13 vs T15 at the same working depth, we can see that there are highly significant savings of 23.88% in total energy consumption, 40% in the demand for draft force and 38.68% in the specific resistance of the soil, for a single non-significant increase in the disturbed soil area of 7.35%, that due to the adjustment of operating parameters, therefore that the use of six bodies in accordance with the parameters of chisels vertical tillage instead of the recommended fixes seven bodies currently used in the traditional system.

For the comparison of the integral arrangements T14 vs T15 we can see that the T14 has a significant increase in draft force demand for passing from 19.88 to 33.04 kN, but no significant change in the disturbed area compared to T13 when going from 20 to 30 cm deep, therefore, it is assumed that it is being applied plowing to critical depth which causes instead of being loosening the soil being compacted.

4 Conclusions

The integrated use of the operating parameters (working depth, position and spacing, number of bodies and use of wings) were adjusted arrangements evaluated one, three and six bodies in comparison with the traditional arrangement of seven bodies, achieved a significant reduction in the specific resistance of soil 32, 34.77 and 38.68%, respectively, for individual and integral treatments.

For the total energy consumed results show a significant reduction in the arrangement of six bodies for three depths tested compared with the arrangement of seven bodies currently used as a reference in the traditional system.

The best arrangement for vertical deep tillage was the treatment T13 (four shallows chisel at 20 cm and two deep winged at 30cm) when compare with the integral arrangements T15 (seven chisel at the same deep to 30 cm) can see that there are highly significant savings of 23.88% in the total energy consumed, 40% in power demand, and 38.68% in the soil specific resistance to a single non-significant increase in disturbed soil area of 7.35%, this due to the adjustment of four operating parameters, therefore it is recommended the use of six bodies arrangement with the parameters of chisels vertical tillage instead of seven bodies currently used in the traditional system.

Treatment 14 has a significant increase in draft force demand for passing from 19.88 to 33.04 kN, but no significant change in the disturbed area compared to T13 when going

from 20 to 30 cm deep, therefore, it is assumed that it is being applied plowing to critical depth which causes instead of being loosening the soil being compacted. For this reason, it is necessary to adjust the operating parameters in spacing and depth of work.

The results obtained in this study about savings energy, has the purpose to associated with precision agriculture technology in order to optimize the energy requirements by the variable rate application (VRT) in primary deep tillage.

References

- Adewoyin, A. O., and E. A. Ajav. 2013. Fuel consumption of some tractor models for ploughing operations in the sandy-loam soil of Nigeria at various speeds and ploughing depth. *Agric Eng Int: CIGR Journal*, 15(3): 67–74.
- Arvidsson, J., T. Keller, and K. Gustafsson. 2004. Specific draught for mouldboard plough, chisel plough and disc harrow at different water contents. *Soil and Tillage Research*, 79: 221-231.
- Brunotte, J., and C. Sommer. 2009. Konservierende Bodenbearbeitung aus Sicht der Wissenschaft. In: *Intelligenter Pflanzenbau*. S. 110 – 144, 3. Auflage. Amazone- Werke.
- Cadena, Z. M; S.G. Campos M; A. López S; A. Zermeño G.2012. Configuración de herramientas de labranza vertical para reducir demanda de energía. *Terra Latinoamericana*, vol. 30, núm. 3, 2012, pp. 279-288.
- Camacho-Tamayo, J. H. y G. A. Rodríguez. 2007. Evaluación de implementos de labranza a diferentes velocidades de operación y contenidos de agua del suelo. *Agricultura Técnica* 67(1): 60-67.
- Campos-Magaña, .S.G. and Wills B.M.D. 1995. Force Measurement-recording and data analysis system for tillage tolls. *Agricultural mechanization in Asia, Africa and Latin America* 24(4):13-17.
- Cavalari, C. K. y T. A. Gemtos. 2002. Evaluation of four conservation tillage methods in the sugar beet crop. *The CIGR E-Journal*. Volume 4. The Internet-First UniversityPress. Cornell University Library. Ithaca, NY, USA.
- Chaudhuri, D. 2001. Performance evaluation of various types of furrow openers on seed drills: a review. *J. Agric. Eng. Res.* 79:125-137.
- Dutzi, S. 2008. The effects of various tillage and sowing systems on energy input and crop production parameters. *Agricultural Engineering. Landtechnik*, 63 (6): 338-340.
- Godwin, R.J., 2007. A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces. *Soil Till. Res.* 97, 331–340.
- Hetz, E. y Barrios I.1996. Costos de operación de tractores y máquinas agrícolas. EN: IV Sem. Nac. de Mecanización Agrícola. Univ. de Concepción, Chillán. 28-29 Noviembre. 26 p.
- Hoogmoed, W. B. and R. Derpsch. 1985. Chisel Ploughing as an alternative tillage system in Parana Brazil. *Soil Tillage Res.* 6: 53-67.
- Kalk, W. D., and K. J. Hülsbergen. 1999. Diesel fuel input in plant production. *Agricultural Engineering. Landtechnik*, 54 (6): 332-333.

- Kichler, C.M.; J.P. Fulton; R.L. Raper; W.C. Zech; T.P. McDonald; C.J. Brodbeck 2007. Spatially Monitoring Tractor Performance to Evaluate Energy Requirements Of Variable Depth Tillage and Implement Selection ASABE annual meeting 2007 paper 071028.
- Kumar, A. and T.C. Thakur. 2005. An investigation into comparative test of conventional and winged subsoilers. ASAE paper no. 051061. ASAE Annual International Meeting, Tampa, FL, USA.
- Magalhães, P.S.G., e W.R. Souza. 1990. Subsolador: Influência de parâmetros geométricos no mecanismo de forças. 2:1033. XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Piracicaba, Sao Paulo, Brasil, Julio de 1990.
- Manuwa, S. I. 2009. Performance evaluation of tillage tines operating under different depths in a sandy clay loam soil. *Soil Tillage Res.* 103: 399-405.
- Mathur, S. M. and K. P. Pandey. 1992. Influence of system parameters on performance of reversible hoe type furrow opener for animal drawn seed and fertilizer drills. In: *Proceedings of International Agricultural Engineering Conference, Vol. I* (Salokhe V M; Singh G; Ilanganleke S G, eds), pp 143-150. Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- McKyes, E. 1985. *Soil Cutting and Tillage. Developments in Agricultural Engineering, vol. 7.* Elsevier, Amsterdam.
- Moitzi, G., H. Weingartmann and J. Boxberger. 2006. Effects of tillage systems and wheel slip on fuel consumption. In: *The Union of Scientists - Rouse: Energy Efficiency and Agricultural Engineering, 7. - 9. June 2006, Rouse, Bulgaria, 237-242, ISSN 1311-9974.*
- Naderloo, L., R. Alimadani, A. Akram, P. Javadikia, and H. Z. Khanghah. 2009. Tillage depth and forward speed effects on draft of three primary tillage implements in clay loam soil. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 76(3): 382– 385.
- Olatunji, O. M., W. I. Burubai, and R. M. Davies. 2009. Effect of weight and draught on the performance of disc plough on sandy loam soil. *Journal of Applied Science, Engineering and Technology*, 1(1): 22–26.
- Pandey, M. M. 2004. Present status and future requirements of farm equipment for crop production. Central Institute of Agricultural Engineering, Bhopal. Pp.67.
- Payne, P.C.J., D.W Tanner., 1959. The relationship between rake angle and the performance of simple cultivation implements. *J. Agric. Eng. Res.* 4 (4), 312–325.
- Pérez, C. (2002). *Matlab y sus aplicaciones en las Ciencias y la Ingeniería.* Madrid: Edit. Prentice Hall. jul. 2007, tercera edición vol.10, no.2, p.54-61. ISSN 1810-9993.
- Pimentel, D., Marklein, A., Toth, M. A., Karpoff, M., Paul, G. S., McCormack, R., Kyriazis, J., and Krueger, T. (2008). Biofuel Impacts on World Food Supply: Use of Fossil Fuel, Land and Water Resources. *Energies* 1: 41–78; doi:10.3390/en1010041, online, open access. <http://www.mdpi.org/energies/papers/en1020041.pdf>.
- Raper, R. L. and J. S. Bergtold. 2007. In row subsoiling: A review and suggestions for reducing cost of this conservation tillage operation. *Appl. Eng. Agric.* 23: 463-471.
- Sahu, S., and H. Raheman. 2006. Draught prediction of agricultural implements using reference tillage tools in sandy clay loam soil. *Biosyst. Eng.* 94: 275-284.
- Shrivastava, A. K. and Satyendra Jha. 2011. Modification and performance evaluation of tractor drawn improved till plant machine under vertisol. *Agric Eng Int: CIGR Journal, Agric Eng Int: CIGR Journal*, 13(2).
- Siemens, J. C; J. A. Weber; T.H. Thornburn. 1965. Mechanics of soil as influenced by tillage tools. *Transactions of ASAE*, 8(1), 1-7.
- Spoor, G. and R.J. Godwin. 1978. An experimental investigation into deep loosening soil by rigid tines. *J. Agric. Engng. Res.* 23:243-258.
- Taniguchi, T., J. T. Makanga, K. Ohitomo, and T. Kishimoto. 1999. Draft and soil manipulation by a moldboard plow under different forward speed and body attachments. *Transactions of the ASAE*, 42(6): 1517–1521.
- Wildman, W.E., C.A. Reaves, and W.R. Gill. 1978. Effect of slip plow design on draft forces and soil loosening. *Trans. ASAE* 21:422-426.

4.6 Resultados de la Fase VI (Labranza Vertical + Agricultura de Precisión)

4.6.1. Consumo energético en la aplicación variable de labranza primaria del suelo

Los carburantes de origen fósil, como la gasolina y el gasóleo “diésel”, tienen una capacidad energética de 32.18 MJl-1 y 35.86 MJl-1, respectivamente (IEA, 2013). De esta manera, el potencial energético por unidad de volumen es otro valor fundamental para determinar el rendimiento final del carburante. La gasolina ofrece un potencial por unidad de volumen de 9.700 Whl-1 (vatios hora por litro). Y el gasóleo con 10.700 Whl, explicando que los modelos diésel proporcionen autonomías superiores a los de gasolina.

La ventaja energética del Diesel sumada a la eficiencia del motor hace que los vehículos que utilizan este tipo de combustible tengan mejor rendimiento que los de gasolina. El secreto está en la compresión del aire. Mientras más aire se comprime, el combustible puede interactuar con más oxígeno y originar una explosión mayor que resulta en más potencia para el motor. El motor de gasolina tiene un radio de compresión de 8:1 a 12:1 mientras que el Diesel lo tiene entre 14:1 y 25:1.

Una vez conocido el valor de la densidad energética del diésel (35.86 MJl-1), ahora es posible determinar el ahorro en litros de este combustible, utilizando los valores mostrados en la cuadro 4.3.

Cuadro 4.3: Resultados del desempeño energético de diferentes arreglos con parámetros de lanzanza vertical.

Tratamiento/ grupo	Arreglo	Cinceles-Fuerza de tiro (kN)	Área disturbada del suelo (m ²)	Resistencia específica del suelo (kNm ⁻²)	Energía consumida(MJ ha ⁻¹)
1/1	1DC30UNW	14.99abc	0.126d	121.10a	**
2/1	1DC20W	9.88c	Nq	Nq	**
3/1	1DC30W	13.65abc	0.171cd	82.40abc	**
4/1	1DC40W	23.94abc	Nq	Nq	**
5/1	2DC30W	34.91a	0.434abcd	80.67abc	**
6/2	2SC20	13.57abc	0.157d	86.86ab	**
7/2	4SC20	14.03abc	0.410abcd	34.25c	302.5e
8/3	2SC20+1DC30UNW	23.12abc	0.292abcd	70.77abc	Nq
9/3	2SC20+1DC20W	11.96bc	0.191cd	62.35bc	423.9de
10/3	2SC20+1DC30W	15.08abc	0.236abcd	63.76bc	514.8de
11/3	2SC20+1DC40W	18.98abc	0.268abcd	70.79abc	688.8cd
12/4	4SC20+2DC20W	20.41abc	0.590abc	36.62c	664.5cd
13/4	4SC20+2DC30W	19.88abc	0.630ab	32.10c	823.1bc
14/4	4SC20+2DC40W	33.04ab	0.640ab	49.48bc	1121.2a
15/5	4SC30+3DC30UNW	33.12ab	0.680a	52.35bc	1093.2ab

Nota: * Arreglo: DC: cincel profundo, UNW: sin alas, W: con alas, SC: cincel somero, 20, 30, 40: profundidad de trabajo.

Gasto energético en litros de diésel del T12, T13, T14 y T15

Para medir el funcionamiento de los arreglos y poder cuantificar su desempeño se utilizaron únicamente los arreglos descritos a continuación:

T12: Tratamiento de seis cuerpos de cinceles (arreglo propuesto) Cuatro cinceles frontales a una profundidad de trabajo de 0.20 m, con espaciamiento de 0.60 m entre cuerpos + Dos cinceles traseros con alas a una profundidad de trabajo de 0.20 m y espaciados a 1.20 m. T13: Tratamiento de seis cuerpos de cinceles (arreglo propuesto) Cuatro cinceles frontales a una profundidad de trabajo de 0.20 m, con espaciamiento de 0.60 m entre cuerpos + Dos cinceles traseros con alas a una profundidad de trabajo de 0.30 m y espaciados a 1.20 m. T14: Tratamiento de seis cuerpos de cinceles (arreglo propuesto) Cuatro cinceles frontales a una profundidad de trabajo de 0.20 m, con espaciamiento de 0.60 m entre cuerpos + Dos cinceles traseros con alas a una profundidad de trabajo de 0.40 m y espaciados a 1.20 m. T15: Tratamiento de siete cuerpos de cinceles (sistema tradicional) Cuatro cinceles frontales a una profundidad de trabajo de 0.30 m, con espaciamiento de 0.75 m entre cuerpos + Tres cinceles traseros sin alas a una profundidad de trabajo de 0.30 m y espaciados a 0.75m.

Cuadro 4.4: Funcionamiento energético de los arreglos de seis y siete cuerpos.

Tratamiento	Fuerza de tiro (kN)	Área disturbada de suelo (m²)	Resistencia específica del suelo (kNm⁻²)	Energía consumida (MJh⁻¹)	Consumo de combustible (lh⁻¹)
T12	20.41	0.59	36.62	664.5	18.53
T13	19.88	0.63	32.1	823.1	22.95
T14	33.04	0.64	49.48	1093.2	31.26
T15	33.12	0.68	52.35	1093.2	30.48

En el cuadro 4.4 se puede apreciar los valores obtenidos en consumo de combustible, donde el T13 muestra una reducción significativa de 7.53 lha⁻¹ de diésel en comparación con el T15, utilizado actualmente como referencia del sistema tradicional. Por otra parte, el T12 representa un ahorro de 12.73 l de diésel en comparación con el T15, solo que trabajando a diferentes profundidades de trabajo, 0.20 y 0.30m, respectivamente. Para el T14, se muestra un consumo mayor de 0.78 l de diésel en comparación con el T15, solo

que este resultado se debe a que el arreglo de seis cuerpos del T14 está trabajando a una profundidad de 0.40m en comparación con el arreglo tradicional de siete cuerpos a una profundidad de trabajo de 0.30m. Este ahorro significativo mostrado en los tratamientos T12, T13 y T14 en comparación con el tratamiento T15 únicamente representa la aplicación de los parámetros de labranza vertical.

En cuanto al manejo tecnológico de agricultura de precisión, los resultados del mapa de diagnóstico mostraron que a la profundidad de 0.40m se localizó un área compacta o de capas duras de aproximadamente el 80% de la superficie total muestreada. Dicha superficie requiere labranza, ya que los rangos de las magnitudes de las mediciones de resistencia a la penetración fueron superiores a 2 Mpa y podrían producir impedancia mecánica en el desarrollo de los cultivos. El 20% restante, no requiere la aplicación de labranza, lo que significa un ahorro equivalente a 6 l de combustible.

Capítulo V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se desarrolló y acondicionó un sistema integral para el monitoreo de las fuerzas de reacción de suelo a través del uso de transductores octagonales de anillo extendido mostrando una confiabilidad superior al 99 por ciento. Este equipo permitirá hacer más eficiente el uso de la energía y otorgará mayor precisión en la prueba de evaluación de implementos de labranza actualmente normada en nuestro país.
- La resistencia específica del suelo, se redujo un 13 por ciento en la aplicación de labranza profunda por la selección de parámetros de labranza vertical basados en la teoría de la profundidad crítica en comparación con la aplicación del sistema convencional.
- Se diseñó, construyó y evaluó un prototipo articulado de arado de cinceles capaz de aplicar en forma variable labranza vertical profunda. Las características y parámetros de diseño presentan una adecuada funcionalidad en los requerimientos para su operación.
- Se desarrolló un carro porta-sensores con la integración de un Penetrometro y el sistema GPS-RTK para la medición de la magnitud, profundidad y geolocalización de las capas compactadas del suelo. Este equipo está integrado por dos sensores. El primero utilizado para la medición de fuerzas y consta de un sensor de anillo con una herramienta de penetración tipo cono con una capacidad de medición de

hasta 9MPa, obteniendo una sensibilidad de 13.15NmV-1 y una alta confiabilidad de sensado con coeficientes de correlación del 99.6% entre la fuerza aplicada y el voltaje de salida. El segundo sensor de profundidad permite medir la ubicación desde la superficie del suelo hasta una profundidad máxima de 0.60 m con precisión de hasta 0.01 m. La constante obtenida fue de 258.5mm.V-1 con un coeficiente de correlación de 100% entre las profundidades de penetración y la salida de voltaje.

- Se generaron tres mapas de diagnóstico de (RP) para a las profundidades de 0.20, 0.30 y 0.40 m con precisión GPS-RTK. Dichos mapas contienen atributos de la magnitud de la RP y la ubicación de las capas compactadas, lo que permitirá generar regiones por superficie y rangos de profundidad para la toma de decisiones en el manejo de la labranza. Una aplicación potencial de este sensor es la de identificar zonas para la labranza de profundidad variable de sitio específico.
- Se desarrolló un manual que describe el procedimiento para la aplicación variable de labranza profunda inteligente utilizando el controlador FMX, la facilidad Survey y FieldLevel II.
- Se acondicionó un sensor de proximidad tipo sonar, para verificar la distancia de profundidad de trabajo en tiempo real de los desplazamientos por encima y por debajo de la sección articulada con respecto a la sección fija o nivelada del prototipo , se obtuvo una confiabilidad de monitoreo del 99.6
- El prototipo articulado de arado de cincales realizó la aplicación variable de labranza profunda inteligente en un rango de desplazamiento de 0.20, 0.30 y 0.40 m, obedeciendo las instrucciones de la prescripción, mediante la manipulación del sistema electrohidráulico a una señal emitida por el controlador Fmx.
- El sistema de control ha sido capaz de aplicar labranza profunda de forma variable e inteligente.
- El uso integrado de los parámetros de funcionamiento (profundidad de trabajo, posición y espaciamento, número de cuerpos y el uso de las alas) fueron ajustados

en arreglos evaluados en uno, tres y seis cuerpos en comparación con el arreglo tradicional de siete cuerpos, logrando una reducción significativa en la resistencia específica del suelo en 32, 34.8 y 38,7%, respectivamente, para los tratamientos individuales e integrales.

- Para la energía total consumida los resultados muestran una reducción significativa en el arreglo de seis cuerpos a tres profundidades diferentes (0.20, 0.30 y 0.40 m) evaluadas en comparación con el arreglo de siete cuerpos que actualmente se utilizan como referencia en el sistema tradicional.
- El mejor arreglo para la labranza vertical profunda fue para el tratamiento T13 (cuatro cinceles someros a 20 cm de profundidad y dos cinceles profundos con alas a 30cm) en comparación con el arreglo integral T15 (siete cinceles a la misma profundidad de trabajo a 30 cm) se puede observar que existe un ahorro altamente significativo de 23.9% en la energía total consumida, 40% en la demanda de fuerza de tiro y 38.7% en la resistencia específica del suelo, por un solo incremento no significativo en el área disturbada del suelo de 7.35%, esto debido al ajuste de cuatro parámetros de funcionamiento, Por lo tanto, se recomienda el uso de seis cinceles de acuerdo con los parámetros de cinceles labranza vertical en lugar de siete cuerpos que actualmente se utilizan en el sistema tradicional.
- En el Tratamiento 14 se tiene un aumento significativo en la demanda de fuerza de tiro al pasar de 19,88 a 33,04 kN, pero no existió ningún cambio significativo en el área disturbada del suelo en comparación con el T13 cuando se va de 20 a 30 cm de profundidad, por lo tanto, se asume que se está aplicando la labranza a una profundidad crítica, lo que ocasiona que en lugar de aflojar el suelo, este se compacte. Por esta razón, es necesario ajustar los parámetros de funcionamiento en el espaciamiento y la profundidad de trabajo.
- En los valores obtenidos en consumo de combustible, se muestra que el T13 muestra una reducción significativa de 7.53 lha-1 de diésel en comparación con el T15, utilizado actualmente como referencia del sistema tradicional. Por otra parte, el T12

representa un ahorro de 12.73 l de diésel en comparación con el T15, solo que trabajando a diferentes profundidades de trabajo, 0.20 y 0.30m, respectivamente. Para el T14, se muestra un consumo mayor de 0.78 l de diésel en comparación con el T15, solo que este resultado se debe a que el arreglo de seis cuerpos del T14 está trabajando a una profundidad de 0.40m en comparación con el arreglo tradicional de siete cuerpos a una profundidad de trabajo de 0.30m. Este ahorro significativo mostrado en los tratamientos T12, T13 y T14 en comparación con el tratamiento T15 únicamente representa la aplicación de los parámetros de labranza vertical.

- En cuanto al manejo tecnológico de agricultura de precisión, los resultados del mapa de diagnóstico mostraron que a la profundidad de 0.40m se localizó un área compacta o de capas duras de aproximadamente el 80 % de la superficie total muestreada, Dicha superficie requiere labranza, ya que los rangos de las magnitudes de las mediciones de resistencia a la penetración fueron superiores a 2 Mpa y podrían producir impedancia mecánica en el desarrollo de los cultivos. El 20 % restante, no requiere la aplicación de labranza, lo que significa un ahorro equivalente a 6 l de combustible.
- Los resultados obtenidos en este estudio sobre el ahorro de energía, tiene el propósito de asociarlos con la tecnología de agricultura de precisión, con el fin de optimizar los requerimientos de energía con la aplicación de tasa variable (VRT) en la labranza profunda primaria.

RECOMENDACIONES

1. Evaluar la respuesta del sistema de control inteligente en condiciones de suelos planos.
2. Se recomienda evaluar el programa **AgGPS Multiplane**, el cual permitirá diseñar pendientes múltiples para mejorar la respuesta en tiempo de los cambios de variabilidad de las alturas con respecto al punto maestro o referencia de nivelación de su campo. Utilizando la información topográfica colectada por el AgGPS, se construye un modelo de superficie y se puede entonces crear un plan de diseño para la

aplicación de labranza en base a la facilidad de nivelación. Cuando se esté a nivel en el campo , las cotas o alturas que se localicen por encima o por debajo de la referencia (simulación de prescripción de labranza), el sistema AgGPS Field Level controlará automáticamente la parte móvil de nuestro arado articulado de cinces en base a la posición del tractor, mostrando continuamente la desviación entre la altura actual de la posición del receptor de nuestro equipo y la profundidad de labranza requerida en esa posición y corrigiéndola para realizar la labranza variable según el diseño cargado en Multiplane.

Capítulo VI

Literatura Citada

Acedo, J. 2006. Instrumentación. Ediciones Díaz de Santos. Primera edición. España, 2006.

Adamchuk, V.I., Morgan, M.T., Sumali, H., 2001b. Mapping of spatial and vertical variation of soil mechanical resistance using a linear pressure model. Paper No. 01-1019, ASAE, St. Joseph, Michigan.

Adamchuk, V.I., Hummel, J.W., Morgan, M.T., Upadhyaya, S.K., 2004, On- the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 44, 71-91.

Adamsen, F., Barnes, E., Hunsaker, D., Bautiska, E. y Clemmens, A. (2000), Surface irrigation and precision crop management, in 'Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture', Bloomington, MN, USA.

Agamennoni, R. 1996. Rotaciones y labranzas en la región semiárida bonaerense sur. En *Labranzas en la Región Semiárida Argentina*. D. Buschiazzo, J. Panigatti y F. Babinec. Ed. INTA CERLAP-San Luis.

Agbede, T.M. 2006. Effect of tillage on soil properties and yam yield on an Alfisol in southwestern Nigeria. *Soil and Tillage Research* 86:1-8.

Agüera, V.J. y Pérez, R. M. 2013. Agricultura de precisión: Hacia la integración de datos espaciales en la producción Agraria. *Revista ambiental*, vol. 13.

Alihamsyah, T., Humphries, E.G., Bowers Jr., C.G., 1990. A technique for horizontal measurement of soil mechanical impedance. *Transactions of the ASAE* 33 (1), 73–77.

Alonso Sarria, f. 2000. Introducción a los sistemas de información geográfica. Disponible en: <http://www.um.es/~geograf/sig/siggf2000/temario.pdf>

Aluko, O.B. and D.A. Seig. 2000. An experimental investigation of the characte-

ristics of and conditions for brittle fracture in two-dimensional soil cutting. *Soil Tillage Res.* 57:143-157. Andrade, P., Rosa, U.A., Upadhyaya, S.K., Jenkins, B.M., Aguera, J., Josiah, M., 2001b. Soil profile force measurements using an instrumented tine. Paper No. 01-1060, ASAE, St. Joseph, Michigan.

Andrade, P., Upadhyaya, S.K., Jenkins, B.M., Filho, A.G.S., 2002. Evaluation of UC Davis compaction profile Sensor. Paper No. 02-1185, ASAE, St. Joseph, Michigan.

Andrade S. P., Upadhyaya S.k, Plouffe C.; Poutre B. 2008. Development and field evaluations of a field-ready soil compaction profile sensor for real-time applications. *Transactions of the ASABE.* 24(6): 743-750.

Andrade S. P., Upadhyaya S.k, Jenkins B.M. 2008. Development, construction and field evaluation of a soil compaction profile sensor. *Transactions of the ASABE.* 50(3): 719-725. Arvidsson, J., T. Keller, and K. Gustafsson. 2004. Specific draught for mould-board plough, chisel plough and disc harrow at different water contents. *Soil Tillage Res.* 79:221-231.

ASAE Standards, 49th Ed. 2002a. S313.3. Soil cone penetrometer. St. Joseph, Mich. ASAE.

ASAE Standards, 49th Ed. 2002b. EP542. Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer. St. Joseph, Mich.: ASAE.

Ashburner, J. y Sims, B. 1984. Elementos de diseño del tractor y herramienta de labranza. IICA, San José, Costa Rica. 474 p. (Serie de Libros y Materiales Educativos No. 56).

Atwell, B.J. 1993. Response of roots to mechanical impedance. *Environmental and experimental botany* 33(1): 27-40.

Auernhammer, H. (2001), 'Precision farming — the environmental challenge', *Computers and Electronics in Agriculture* 30(1-3), 31 – 43.

Balastreire, L.A. Potencial de utilização dos conceitos de agricultura de precisão na cultura da cana-de-açúcar. *S.T.A.B., Piracicaba, v.16, n.4, p.22-26, 1998.*

Barber, R.G., Navarro, F. y Orellana, M. 1993. *Labranza Vertical*. Centro de Investigación Agrícola Tropical, Misión Británica en Agricultura Tropical y Proyecto de Desarrollo Tierras Bajas del Este del Banco Mundial, Santa Cruz, Bolivia.

Bauer, M., Davis, J., Sudduth, K. y Drummond, S. (2000), Agronomic and economic evaluation of variable-rate seeding on missouri soils, in 'Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture (CD)', Bloomington, MN, USA.

Best, S. 2007. Necesidades tecnológicas de los cultivos: La agricultura de precisión como una alternativa atractiva y rentable. Revista Agropropuesta. Argentina.

Biagi P. N. y Goes M. P. S., 2008. Facultad de Ingeniería Agrícola, Unicamp, Campinas, SP. Traducción: Ing. Agr. Daniel R. Fernández – EEA Salta – INTA. 2008.

Bolstad, P. (2005) GIS Fundamentals: A first text on Geographic Information Systems, Second Edition. White Bear Lake, MN: Eider Press, 543 pp.

Bonifaz del C., A. 2012. Evaluación de un transductor integral para determinar las magnitudes de las fuerzas que actúan en los implementos de labranza. Tesis, Licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.

Boone, F.R. 1988. Weather and other environmental factors influencing crop responses to tillage and traffic. Soil Tillage Research 11(3-4): Pp.283-324.

Bowen, H. D. 1981. Alleviating mechanical impedance. In Arkin, A. F. and Taylor, H. M. (ed.) Modifying the root environment to reduce crop stress. Am. Soc. Agric. Eng. Monogr. 4. ASAE, St. Joseph, MI. p. 21-57.

Boydas, M.G and N. Turgut. 2007. Effect of tillage implements and operating speeds on soil physical properties and wheat emergence. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 31, 399-412.

Bradford, J. L. 1986. Penetrability. In: Methods of Soil Analysis, Madison, ASASS-SA Inc. Publisher, 463-477.

Bragachini, M., Méndez A., Scaramuzza F. 2004. Agricultura de Precisión y Siembra Variable de insumos en tiempo real mediante el uso de GPS y una prescripción con sembradora IOM Inteligente Mega de 12 surcos a 52,5 cm. INTA Manfredi.

Bragachini, M. 2005. Dosis Variable de Insumos en tiempo real Equipamiento. Proyecto Agricultura de Precisión – INTA Manfredi.

Bragachini, M. 2010. 9no Curso internacional de agricultura de precisión. Red de agricultura de precisión misterios de agricultura de la nación. Argentina.

Bramley R., 2009. Lessons from nearly 20 years of precision agriculture research, development, and adoption as a guide to its appropriate application. Crop and Pasture Science, 60(3):197–217, 2009.

Camacho-Tamayo, J. H. y G. A. Rodríguez. 2007. Evaluación de implementos de labranza a diferentes velocidades de operación y contenidos de agua del suelo. Agricultura Técnica 67(1): 60-67.

Campos, M.S.G.; Wills, B.; Cadena Z., M; 1992. Consideraciones para el diseño de transductores octagonales y su aplicación en la evaluación de implementos de labranza. Memorias del II Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola (AMIA). Irapuato, Guanajuato. México.

Campos, M.S.G.;1993. Development of minimum maize planter for Mexican agriculture, unpublished phd thesis, Newcastle University, England. 167p.

Campos, M.S.G.; Aragón, R. A.; Cadena, Z. M.; 2000. Diseño y comportamiento de tres transductores de fuerzas para la evaluación de herramienta de labranza. Congreso Latinoamericano de Ingeniería Agrícola. CLIA. X Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola AMIA 2000.

Cassel, D.K., Kachanoski, R.G. y Topp, G.C. 1994: Practical consideration for using a TDR cable tester. *Soil Technology*. 7. pp.113-126.

Centro de Estudios de Finanzas Públicas, 2013. Balanza agroalimentaria, registros de producción 2012. VXII Legislatura. Gobierno de la Republica, México.

Chang, J., Clay, D., Carlson, C., Clay, S. y Reese, C. (2000), The influence of different approaches for identifying inorganic n and p management zones on fertilizer recommendation, in 'Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture (CD)', Bloomington, MN, USA.

Chaudhuri, D. 2001. Performance evaluation of various types of furrow openers on seed drills. A review. *J. Agric. Eng. Res.* 79:125-137.

Chen Y., S. Tessier and N. McLaughlin, 2005. Doubled extended octagonal ring (DEOR) drawbar dynamometer written for presentation at the CSAE/SCGR 2005 Meeting Winnipeg. Manitoba June26-29,2005.

Comforti, P. y M. Giampietro. 1997. Fossil energy use in agricultura: an international comparison. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 65(3):231-234.

Cook N.H. and E. Rabinowicz. 1963. *Physical measurement and analysis*, N.Y.: Addison Wesley, pp. 160–164.

Cook, M.G. y Lewis, W.M. (eds.) 1989. Conservation tillage for crop production in North Carolina. North Carolina Agricultural Extension Service. North Carolina State University, Raleigh, N.C. USA.

Cook, S., Adams, M. y Bramley, R. (2000), What is obstructing the wider adoption of precision agriculture technology?, in 'Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture (CD)', Bloomington, MN, USA.

Cooper, William D.; Helfrick, Albert D. 1991. Instrumentación, electrónica moderna y técnicas de medición, vol. 1. Pag. 101.

Corwin, D.L. y Lesch, S.M. 2005. "Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture". *Computers and electronics in agriculture* 46:11-43.

Cox, S. 2002. Information technology: the global key to precision agriculture and sustainability. *Computers and Electronics in Agriculture* 36:93-111.

Cruz, J.; Nonato, R.; Rocha, S.; Camacho, J.; Castro, R. 2010. spatial analysis of physical attributes and organic charcoal from yellow-red alfisol with sugarcane crop. *ciencia e agrotecnologia, lavras*, v.34, n.2, p.217-278.

Daberkow, S. y McBride, W., 2000. Adoption of precision agriculture technologies by us farmers, in 'Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture (CD)', Bloomington, MN, USA.

Dalton, F.N. (1992): Development of Time-Domain-Reflectometry for measuring soil water content and bulk soil electrical conductivity. In *Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice*. Soil Sci. Soc. Am. Special Pub. No.30. pp. 143-167.

Doerge, T. (1998), Defining management zones for precision farming, *Crop Insights* 8, 21.

Elizondo, E., J.L. Costa, E. Suero, K.P. Fabrizzi y F. García. 2001. Evaluación de algunas propiedades físicas del suelo luego de la introducción de labranzas verticales en suelo bajo la siembra directa. *Ciencia del suelo* 19(1):11:19.

Ellsbury, M., Malo, D., Clay, D., Clay, S. y Carlson, C. (2000), Spatial distribution of soil dwelling stages of northern corn rootworm in relation to measurable soil and crop characteristics, in 'Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture (CD)', Bloomington, MN, USA.

Ess, D., Parsons, S. y Strickland, R. (1999), 'Evaluation of commercially-available software for grain yield mapping', *American Society of Agricultural Engineers (ASAE Paper No. 97-1033)*.

Evans, D., Sadler, E., Camp, C. y Millen, J. (2000), Spatial canopy temperature measurements using center pivot mounted irts, in 'Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture (CD)', Bloomington, MN, USA.

FAO. 1999. "Sistemas de información geográfica para un desarrollo sostenible". *Servicio del medio ambiente y los recursos naturales (sdrn) dirección de investigación, extensión y capacitación de la FAO (organización de las naciones unidas para la agricultura y*

la alimentación). Disponible en: <http://www.fao.org/sd/spdirect/gis/eigis000.htm>

FAO. 2000. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Boletín de tierras y aguas de la FAO. Roma, Italia, P. 204.

FAO. 2003. “Manual de prácticas integradas de manejo de conservación de suelos”. (Texto de manual). http://www.fao.org/ag/ags/agse/agse_s/7mo/iita/iita.htm

Friedrich, T. 1997. Conceptos y objetivos de la labranza en agricultura conservacionista. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Boletín No. 8 de tierras y aguas de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 4: 29-38. Roma Italia.

Garner, T.H.; Dodd, R. B.; Wolf Dan; Peiper, U. M. 1988. Force analysis and application of a three – point hitch dynamometer. Transaction of the ASAE. 1(4):1047-1053.

Gill, W.R. and W.F. McCreery. 1960. Relation of size of cut to tillage tool efficiency. *Agricultural Engineering*, 41, 372-374. Gill, W. y Vandenberg, G. 1967. Soil dynamics in tillage and traction. USDA-ARS. *Agriculture Handbook No. 316*, 511 p.

Gimenez, A. y Lamothe, A. (2000), Site specific management: Zinc deficit in an irrigated corn field, in 'Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture (CD)', Bloomington, MN, USA.

Glancey, J.L., Upadahyaya, S.K., Chancellor, W.J., Rumsey, J.W., 1996. Prediction of agricultural implement draft using an instrumented analog tillage tool. *Soil and Tillage Research* 37, 47–65.

Godwin, R.J. (1974). An investigation into the mechanics of narrow tines in frictional soils. Ph.D. Thesis, Univ. of Reading, 248 pp.

Godwin, R. J. 1975. An Extended Octagonal Ring Transducer for Use in Tillage Studies. *J. Agric. Eng. Res.*, 20: 347-352.

Godwin R J; Spoor G; Soomro M S (1984). The effect of tine arrangement on soil forces and disturbance. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 30, 47–56.

Godwin, R. J., Magalhaes, P. S. G., Miller, S. M. and Fry, R. K. 1987. Instrumentation to Study the Force System and Vertical Dynamic Behavior of Soil-engaging Implements. *J. Agric. Eng. Res.*, 36: 301-310.

Godwin, R.J.; Reynolds, A. J.; O'Dogherty; Al-Ghazal, A. A. 1993. A triaxial dynamometer for force and moment measurements on tillage implements. *J. Agric. Engng. Res.* 55:189-205.

Godwin, R. y O'Dogherty, M. (2007), 'Integrated soil tillage force prediction models', *Journal of Terramechanics* 44(1), 3 – 14.

Griffin, T., Popp, J. y Buland, D. (2000), Economics of variable rate applications of phosphorus on a rice and soybean rotation in arkansas, in 'Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture (CD)', Bloomington, MN, USA.

Gutiérrez, M., J. 2012. (Sensores de Diagnostico Aplicados a la Labranza para Agricultura de Precisión). Tesis de Nivel Licenciatura. Departamento de Maquinaria Agrícola. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Hayhoe, H., Lapen, D., McLaughlin, N., Topp, G. y Curnoe, W. (2000), Spectral analysis and filtering of measurements of mouldboard plow draft, in 'Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture (CD)', Bloomington, MN, USA.

Heiniger, R. y Meijer, A. (2000), Why variable rate application of lime has increased grower profits and acceptance of precision agriculture in the southeast, in 'Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture (CD)', Bloomington, MN, USA.
Henríquez C. y Cabalceta G. 1999. Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque Agrícola. ACCS. 1 ed. San José, Costa Rica. Pag.111.

Hinojosa G., M.; 2003. Desarrollo de un transductor de fuerzas para la evaluación de implementos integrales en tractores categoría II basado en el diseño octagonal extendida, tesis, Licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo Coahuila.

Hoag, D.L., R.R. Yoerger 1975. Analysis and desing of load rings. Transactions of the ASAE 18(6):995-999.

Hoogmoed. W.B. 1999 Tillage for soil and water conservation in the semiarid tropic. Wageningen Agricultural University. The Netherlands.

Hossne, G. A. J. y Álvarez C. E. A. 2007. Influencia de la posición y número de los cuerpos del arado de cincel en un suelo de sabana de Venezuela. *Revista UDO Agrícola* 7.

Hunt, D., 1983. *La Maquinaria agrícola*. Editorial Limusa. Segunda edición.

IDAE. 2006. Ahorro, eficiencia energética y sistemas de laboreo agrícola. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid, España. 2ª Edición corregida.

Iqbal J.; J. Thomasson; J. Jenkins; P. Owens and F. Whisler. 2005 Spatial variability analysis of soil physical properties of alluvial soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 1338-1350.

Johnson, R. y Bradow, J. (2000), Potential for precision management of cotton fiber quality, in 'Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture (CD)', Bloomington, MN, USA.

Johnston K., Hoef J., Krivoruchko K. and Lucas N. 2001. Using ArcGis Geostatistical Analyst. ESRI. 300 p.

Jorajuria d. 2004. La resistencia a la penetración como parámetro mecánico del suelo. Filgueira, R. y Micucci, F. edulp (eds.). Metodologías físicas para la investigación del suelo: penetrometría e infiltrometría. Pag. 43-53.

Kalk, W. D., and K. J. Hülsbergen. 1999. Diesel fuel input in plant production. Agricultural Engineering. Landtechnik, 54 (6): 332-333.

Kepner, R. A., Barger, E:L: 1978 Principles of Farm Machinery. Third Edition, The AVI Publishig Company, Inc Connecticut.

Khan, J., Godwin, R. J., Kilgour, J. and Blackmore, B. S. 2007. Design and Calibration of a Bi-axial Extended Octagonal Ring Transducer System for the Measurement of Tractor-implement Forces. J. Eng. Appl. Sci., 2(1): 16-20.

Kheiralla, A.F. and Y. Azmi. 2002. A Tractor Instrumentation and Data Acquisition System for Power and Energy Demand Mapping. University Putra Malaysia.

Kheiralla, A.F., Yahya, A., Zohadie, M. and Ishak, W. 2003. Design and Development of a Three-point Auto Hitch Dynamometer for an Agricultural Tractor. AJSTD, 20(3 and 4): 271-288.

Kichler,C.M; J.P. Fulton ; R.L. Raper; W.C. Zech; T.P. Mcdonald; C.J. Brodbeck 2007. Spatially Monitoring Tractor Performance to Evaluate Energy Requirements Of Variable Depth Tillage and Implement Selection ASABE annual meeting 2007 paper 071028.

Korkut, I. 2003. A Dynamometer Design and Its Construction for Milling Operation. Materials and Design, 24(8): 631-637.

Kostritsyn, A.K. (1956). (Cutting of cohesive soil medium with knives and cones). Vsesoiuzz Akad. Sel'skokhoziaistvennykh Nauk. Zeml. Mekh. Sborn. Trudov, Leningrad, Vol. 3, pp. 247-290, (NIAE Translation No. 58).

Krüger, G.; Springer, R.; Lechner,W., 1994. Global navigation satellite systems (gnss). Computers and electronics in agriculture.11:3-21.

Kvien, C. y Pocknee, S. (2000), Introduction to why management zone, Technical report, National Environmentally Sound Production Agriculture Laboratory (NESPAL), College of Agricultural and Environmental Science, The University of Georgia.

Lal, R. 1995. Tillage Systems in the tropics: Management options and sustainability implications. Soils Bulletin, Rome, Italy.

Liu, W., Upadhyaya, S.K., Kataoka, T., Shibusawa, S., 1996. Development of a texture/soil compaction sensor. In: Robert, P.C., Rust, R.H., Larson, W.E. (Eds.), Proceedings of the Third International Conference on Precision Agriculture. ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin, pp. 617–630.

Lowen, E. G., Marshall, E. R. and Shaw, M. C. 1951. Electric Strain Gauge Tool Dynamometers. Proc. Soc. Exp. Stress Analysis, 8(2): 1-16.

Lowenberg-DeBoer (1996), Economics of precision farming: payoff in the future, Technical report, Purdue University, IN, USA. URL: <http://pasture.-ecn.purdue.edu/-mmorgan/PFI/pfiecon.html>

Lowenberg, J. 2001. Agricultura de precisión en EE.UU. y potencial de adopción en los países en desarrollo. Universidad de Purdue.

Magalhães, P.S.G., e W.R. Souza. 1990. Subsolador: Influência de parâmetros geométricos no mecanismo de forças. 2:1033. XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Piracicaba, São Paulo, Brasil, Julio de 1990. Sociedad Brasileira de Ingeniería Agrícola, Jaboticabal, Sao Paulo, Brasil.

Magan H., Domene M.A, Ordiales R., y Vidal S. 2002. Self Balance Impedance Bridge, un método alternativo al TDR para la determinación de la humedad edáfica; Departamento de Instrumentación, Estación Experimental de Zonas Áridas del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Almería.

Marín, O. L.; 2003. Desarrollo de un Transductor de fuerzas para la evaluación de implementos integrales a tractores categoría II “Basado en el diseño de vigas sometidas a esfuerzos flexionantes y torsionantes”, tesis, Licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo Coahuila, México.

Marrón G., H. Krüger, A. Vallejos y M. Ripoll. 1998. Requerimientos energéticos de escarificadores de cincel con montantes rígidos y flexibles en un suelo Argiudol típico. Martínez, R. A. 2008. Sistema de medición. Aplicación de Ingeniería Mecánica Agrícola, 52pp., Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Mecanización, La Habana, (re-seña).

Mathur S M; Pandey K P (1992). Influence of system parameters on performance of reversible hoe type furrow opener for animal drawn seed and fertilizer drills. In: Proceedings of International Agricultural Engineering Conference, Vol. I (Salokhe V M; Singh G; Ilanganleke S G, eds), pp 143-150. Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.

McKyes, E. 1985. Soil Cutting and Tillage. Elsevier, Amsterdam, 217 p. (Developments in Agricultural Engineering No 7).

McKyes, E. and Ali, O.S. 1977. The cutting of soil by narrow blades. J. Terrame-

chanics 14(2): 43-58.

McLaughlin, N. B., Tessier, S. and Guilbert, A. 1998. Improved Double Extended Octagonal Ring Drawbar Transducer for 3-D Measurement. *Can. Agric. Eng.*, 40: 257-264.

Méndez A., P. Vélez, D. Villaroel. 2011. Proyecto Maquinas y Agro-componentes Precisos – INTA Manfredi.

Meyerhof, G.G. 1951. The ultimate bearing capacity of foundation. *Geotechnique*, 2(4): 301-332.

Miller, P.C.H. 1971. Soil Failure and the nature of the force system with very narrow tines. B.Sc. Thesis, Nat. Col. Agric. Eng., Silsoe, Benford, U.K.

Moitzi, G., H. Weingartmann, and J. Boxberger. 2006. Effects of tillage systems and wheel slip on fuel consumption. In: *The Union of Scientists - Rouse: Energy Efficiency and Agricultural Engineering*, 7. - 9. June 2006, Rouse, Bulgaria, 237-242, ISSN 1311-9974.

Mojica, L. E. D. 2000. Evaluación de discos cortadores de residuos y abresurcos para labranza de conservación, empleando equipo multiusos de tracción animal, tesis, Licenciatura, Instituto Tecnológico de Veracruz, Ver.; México.

Molin J.P., Menegatti L. y Manzoni C.. 2004. Yield mapping from manually harvested sugar cane in Brazil. *ESALQ-APAGRI-ENALTA*. 11p. 2004.

Moo-Yam, V.M.J. 1999. Desarrollo y evaluación de un sistema de adquisición de datos para la evaluación de implementos de labranza. Tesis, Maestría, Universidad Veracruzana, Instituto de ingeniería, Veracruz, Veracruz, México.

Mouazen, A.M., and H. Ramón. 2002. A numerical-statistical hybrid modeling scheme for evaluation of different manure incorporation tools in a loamy sand soil. *Soil Tillage Res.* 58:19-29.

Navarro, R. 2004. Ingeniería de control analógica digital. McGraw-Hill. Tercera edición, México D.F.

Neuholff, L. A. 1959. Measuring Force in Two or More Members With One Instrument. *Agricultural Engineering* 40(August): 456-457.

O'Callaghan, J. R. and Farrelly, K. M. 1964. Cleavage of soil by tined implements. *J. Agric. Eng. Res.*, 9(3): 259-270.

O'Dogherty, M. J. 1975. A Dynamometer to Measure the Forces on a Sugar Beet

Topping Knife. 20: 339-345.

O'Dogherty, M. J. 1996. The Design of octagonal Ring Dynamometer. *J. Agric.Eng. Res.*, 63: 9-18.

Oriade, C. A. y Popp, M. P. 2000. Precision farming as a risk reducing tool: a whole-farm investigation, in 'Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture', Bloomington, MN, USA, pp. 1-9.

Ortega, B. R y Flores, M. L. 2008. Introducción al manejo sitio-especifico. *Agricultura de precisión: Departamento de recursos naturales y medio ambiente. Vicente Méndez N° 515. Chillán Chile.*

Oussible, M., Crookston RK, Larson WE. 1992. Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield components of wheat. *Agrom. J.* 79:882-886. Owen, G.T., Drummond, H., Cobb, L., Godwin, R.J., 1987. An instrumentation system for deep tillage research. *Transactions of the ASAE* 30 (6), 1578-1582.

Ozuna, G. C. A.; 2011. Evaluación de un transductor integral de fuerza bajo condiciones de campo, tesis, licenciatura, universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo Coahuila, México.

Patterson, J. 1977. Soil compaction-effects on urban vegetation. *J. arboriculture* 3:161-167.

Patterson, J; Murray, J y Short, J. 1980. The impact of urban soils on vegetation. proceedings of the third conference of the metropolitan tree improvement alliance (metria). 3: 33-56.

Payne, P.C.J., Tanner, D.W., 1959. The relationship between rake angle and the performance of simple cultivation implements. *J. Agric. Eng. Res.* 4 (4), 312-325.

Phillips, S.H. y H.M. Young Jr. 1973. *Agricultura sin laboreo, labranza Cero*, universidad de Kentucky.

Popp, J. y Griffin, T. (2000), Adoption trends of early adopters of precision farming in arkansas, in 'Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture (CD)', Bloomington, MN, USA.

Raper, R. L. and J. S. y Bergtold. 2007. In row subsoiling: A review and suggestions for reducing cost of this conservation tillage operation. *Appl. Eng. Agric.* 23: 463-471.

Reutebuch, S., Fridley, J. y Johnson, L. 1999. 'Integrating real-time forest machine activity with gps positional data', American Society of Agricultural Engineers (ASAE Paper No. 99-5037).

Ripoll, P. C. 1975. Equipos de movimiento de tierras, labranza-cultivación. Milagro Ediciones Lérida. España. P. 216.

Roel, A., Plant, R., Pettygrove, G., Williams, J., Young, J. y Deng, J. 2000. Interpreting yield patterns for California rice precision farm management, in 'Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture (CD)', Bloomington, MN, USA.

Rosa, U., Upadhyaya, S., Koller, M., Josiah, M. y Pettygrove, S. 2000. Precision farming in a tomato production system, in 'Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture (CD)', Bloomington, MN, USA.

Runquist, S., Zhang, N. y Taylor, R. K. 2001. 'Development of a field-level geographic information system', *Computers and Electronics in Agriculture* 31(2), 201 – 209.

Sakurai Hai. 1996. An Application of Strain Gages to the Agricultural Machinery. Edit. Farm Machinery section. 2nd Training Division. Tsukuba International Centre (TBIC). Japan International Cooperation Agency (JICA).

Schuler, R. y Lowery, B. 2000. Tdr soil moisture sensor for a subsoiler shank, in 'Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture (CD)', Bloomington, MN, USA.

Shanahan, J., Doerge, T., Snyder, C., Luchiari, A. y Johnson, J. 2000. Feasibility of variable rate management of corn hybrids and seeding rates, in 'Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture (CD)', Bloomington, MN, USA.

Shibusawa, S. 1998. Precision farming and terra-mechanics. Fifth ISTVS Asia-Pacific regional conference in Korea, October: 20-22.

Siemens J C; Weber J A; Thornburn T. H. 1965. Mechanics of soil as influenced by tillage tools. *Transactions of ASAE*, 8(1), 1-7.

Spoor G. and R.J. Godwin. 1978. An experimental investigation into deep loosening soil by rigid tines. *J. Agric. Engng. Res.* 23:243-258.

Stafford, J. y Evans, K. 2000. Spatial distribution of potato cyst nematode and the potential for varying nematicide application, in 'Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture (CD)', Bloomington, MN, USA.

Stafford, J. V. 2000. 'Implementing precision agriculture in the 21st century', *Journal of Agricultural Engineering Research* 76(3), 267 – 275.

Steiner, K.G. 1998. Conserving Natural Resources and Enhancing food security by adopting no tillage. TÖB Publication No. F-5/e GTZ. Echborn. Germany.

Stoorvogel, J. y Orlich, R. 2000. An integrated system for precision agriculture in bananas, in 'Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture (CD)', Bloomington, MN, USA.

Triplett, G. and Van Doren, D. Agriculture Without tillage. Scientific American 236(1) 28-33. 1977.

Upadhyaya, S.K., Rosa, U.A., Ehsani, M., Koller, M., Josiah, M., Shikanai, T., 1999. Precision Farming in a Tomato Production System. Paper No. 99-1147, ASAE, St. Joseph, Michigan.

Vaughan J.; 1975. Application of B & K Equipment to Strain Measurements.

Velázquez, J.U. 2011. Rediseño de prototipo para labranza de precisión. Tesis de licenciatura. Departamento de maquinaria agrícola. UAAAN Buena Vista, Saltillo; Coahuila, México.

Venialgo, Crispín A., Gutiérrez, N. C, Corrales, A., Drganc, D., Asselborn, A. 2002. Estabilidad de agregados y resistencia a la penetración en series de suelos con distintos usos en el Sudoeste del Chaco. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas CD.

Vivero, W. 1998. Prácticas de Conservación de suelos. In Simposio Internacional de Desarrollo Sustentable de Montañas. (Quito, Ec.). pp. 36-361.

Whelan, B., McBratney, A. y Boydell, B. 1997. The impact of precision agriculture, in 'Proceedings of the ABARE Outlook Conference', 'The Future of Cropping in NW NSW', Moree, UK, p. 5.

Wildman, W.E., C.A. Reaves, and W.R. Gill. 1978. Effect of slip plow design on draft forces and soil loosening. Trans. ASAE 21:422-426.

Zhang, N., Taylor, R., Schrock, M. y Staggenborg, S. 1999. 'Applications of a field-level geographic information system (fis) in decision making for precision agriculture', American Society of Agricultural Engineers (ASAE Paper No. 99-3046).

Zhang, N. y Taylor, R. 2000. Applications of a field-level geographic information system (fis) in precision agriculture, in 'Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture (CD)', Bloomington, MN, USA.

Referencias electrónicas

Referencia Web [1] http://www.dte.uvigo.es/recursos/proximidad/Sensores_Proximidad.swf

Referencia Web [2] <http://www.palermo.edu/ingenieria/downloads/pdfwebc&T8/8CyT12.pdf>

Referencia Web [3] <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2010/09/07/136442>

Referencia Web [4] http://www.deere.com.ar/wps/dcom/es_AR/products/equipment/agricultural

Referencia Web [5] <http://www.agroads.com.ar/detalle.asp?clasi=204964>

Referencia Web [6] http://www.editorialagricola.com/v_portal/informacion/informacionver.asp?

Referencia Web [7] <http://www.uhu.es/rafael.sanchez/ingenieriamaquinas/carpeta.html>

Referencia Web [8] <http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica16.htm>

Referencia Web [9] <http://www.tlalpan.uvmnet.edu/oiid/download/Microcontroladores%20y%20plc.pdf>

Figuras o ilustraciones utilizadas (marcas o representación comercial)

1. www.kiowa-ei.com
2. www.wikiagro.com
3. www.veristech.com
4. www.todoagro.com
5. www.umwelt.fritzmeir.de
6. www.trimble.com
7. www.Sapiensman.com

Anexo A

Diseño del transductor

A.1 Cálculos realizados para el diseño del transductor

Las consideraciones de diseño del sensor de Anillo para medir la RP se empleó el método desarrollado por Campos (1993). Para el diseño del ring se empleó las siguientes ecuaciones (A.1) y (A.2) para calcular el esfuerzo flexionante y factor de seguridad respectivamente

$$\sigma = \frac{6Fr}{bt^2} \quad (1.1)$$

$$\sigma_1 = \frac{6(10000)(0.025)}{(0.050)(0.025)^2} \quad \sigma_1 = \frac{1500Nm}{0.00003125m^3} \quad \sigma_1 = 48MPa$$

Donde:

- σ = Esfuerzo flexionante
- F = Fuerza (10000 N)

- r = Radio del ring (0.025 m)
- b = Ancho del ring (0.050 m)
- t = Espesor (0.025 m)

$$F_s = \frac{\sigma_p}{\sigma_l} \quad (1.2)$$

$$F_s = \frac{380MPa}{48MPa} = 7.91$$

Donde:

- F_s = Factor de seguridad
- σ_p = Esfuerzo último del material
- σ_l = Esfuerzo calculado

A.2 Pegado de galgas y cableado

1. Primeramente se procede a lijar las partes donde se colocarían las galgas extensiométricas, con alcohol. Las lijas fueron del 240 y para un mejor acabado se usaron lijas del 360. Se procedió a una limpia con alcohol y acetona para el retiro de impurezas. El octagonal extendido quedó como se muestra en la figura A1.

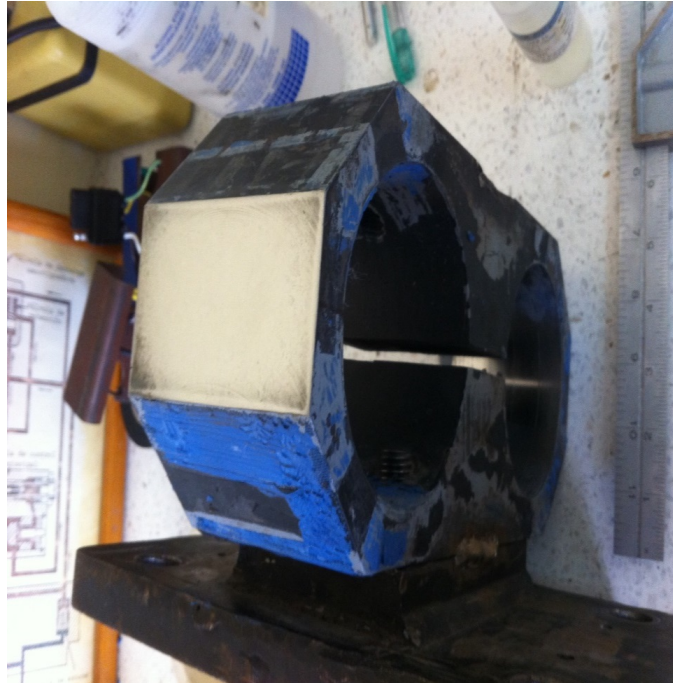


Figura A.1: Octagonal lijado listo para montaje de galgas extensiométricas.

2. Calculamos el centro de los octagonales y demás lados donde se colocarían las galgas, tomando en cuenta los puentes de Wheatstone para poder después cablear y facilitar la conexión de los mismos.



Figura A.2: líneas de posición de las galgas extensiométricas según el puente de Wheatstone

3. Una vez realizado lo anterior se procede a la colocación de las galgas extensiométricas colocadas al centro de la parte superior del octagonal, para después pegarlas con

un pegamento especial que contiene pasta y endurecedor para una mejor adherencia al metal. Todo esto según su numeración, como se muestra en la figura A3.



Figura A.3: Colocación de las galgas extensiométricas en el octagonal extendido

4. Proporcionamos calor por un periodo de 12 horas para apresurar el proceso de pegado como se muestra en la figura A4.



Figura A.4: Proporcionando calor a los octagonales extendidos

5. Cumpliendo el periodo de secado, se procede al chequeo de la resistencia de cada galga, verificando que no estén aterrizadas a tierra.
6. Posteriormente se realiza el pegado de los conectores de galga-cableado como se muestra en la figura A5.



Figura A.5: Colocación de conectores galga-cable.

7. Después realizamos el cableado, un color de cable para cada galga del puente de Wheatstone, El cableado del sensor octagonal queda como se muestra en la figura A6.

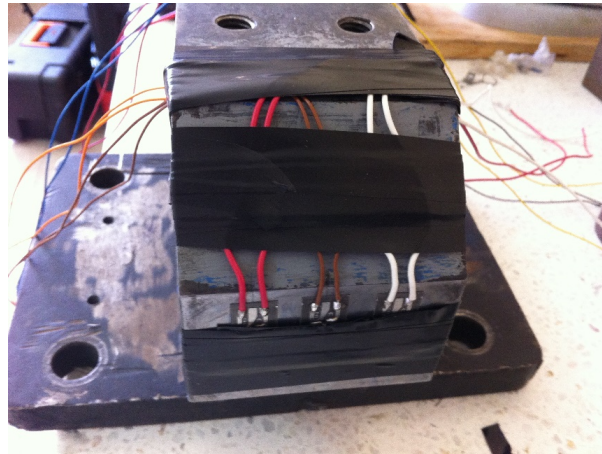


Figura A.6: Sistema de cableado de los sensores octogonales

8. Procedemos a la protección de las galgas con un pedazo de hule, pegando éste con silicón, para después ser aisladas con cinta (cinta de aislar) para una mayor protección de éstas.

Anexo B

Calibración del equipo y transductor

Para esto, se utilizará la computadora que anteriormente habíamos mencionado pero ahora con un software llamado “DaqView” que trabaja en conjunto con:

1. Un amplificador – acondicionador (DBK – 43A) con módulos de 8 canales, con ganancia de $10 \times$ a $1250 \times$ (ϵ), fabricado por Iotech, Inc. (<http://www.iotech.com>) usado para amplificar la señal del transductor y proporcionar una salida estandarizada de voltaje, esto para así poder enviarla a un convertidor analógico - digital. Este además provee el voltaje de excitación al transductor en un rango de 1 - 10 V y 100 mA.

2. Un convertidor analógico – digital (DakBook 2000). El cual es un módulo que se conecta al puerto paralelo de la computadora y que convierte los valores de voltaje en valores digitales para que puedan ser procesados por la computadora. Este sistema se compone de dos partes, la primera, es la que procesa la información y la segunda parte es un banco de baterías que alimenta a la parte de procesamiento. Este módulo está integrado por seis voltajes diferenciales. Con una ganancia de 0.01 – 10 V y con una velocidad de muestreo de 25 – 625 E3 muestras por segundo. Cuenta con 16 canales analógicos y ocho canales digitales con rangos de ganancias en micro deformaciones de 100 a 10 K. Este sistema permite almacenar en forma instantánea los datos en el disco duro del ordenador y permite ver la respuesta de los canales en pantalla durante el proceso. Los datos obtenidos durante el proceso son posteriormente analizados con los paquetes de Excel, Minitab y

MatLab.

Preparación del equipo de adquisición de datos

a) Primeramente se conectará la estructura flotante al enganche de tres puntos del tractor, para así posteriormente enganchar el implemento con el cual se va a calibrar.

b) Se coloca todo el equipo al tractor para después empezar a conectar, tomando en cuenta que los transductores octagonales ya tienen incluido una tarjeta para conexión rápida con cables que van desde el octagonal hasta el DBK - 43a, considerando que hay que tener mucho cuidado en la conexión de los cables con los canales correspondientes del DBK - 43a

c) El DBK-43a va conectado por medio de un puente al DaqBook/2000.

d) En el DaqBook/2000, se conectan los cables de los datos: el que comunica al módulo con el puerto paralelo de la computadora. Se coloca el cable de alimentación que va de las baterías del DaqBook/2000 a la unidad de proceso de datos. Se enciende el DaqBook/2000 y el DBK - 43a.

e) Con todo el equipo ya encendido y bien conectado, se ejecuta el programa Daq-View. En este momento el sistema de adquisición de datos ya está activado, y es recomendable esperar de 5 a 10 minutos para iniciar la captura de datos, ya que las galgas extensiométricas deben alcanzar su temperatura de operación o de lo contrario se puede obtener datos erróneos.

Calibración directa del equipo

Esta se calibra de acuerdo a los parámetros que nosotros queremos obtener, se calibra canal por canal, pero antes debe de estar el DBK - 43a en la posición de "cal.^{en} la parte posterior; se puede calibrar la excitación, offset, gain y scaling. Para calibrar el bridge y ver en que rango se estará guardando los datos, debe de estar el programa en ejecución y en posición normal, y girar el potenciómetro del offset hasta obtener el valor deseado.

Registro de Información

a) En la barra de herramientas se presiona el icono DATA y una vez abierto se presiona el botón ACQUIRE donde nos muestra otra ventana, donde para empezar a almacenar los datos se presiona MANUAL TRIGGER.

b) Antes que nada, tendremos que tener lista las conexiones con los sensores acoplados al implemento y este a su vez enganchado al tractor. En seguida deberá estar acoplado el transductor integral a los tres puntos de enganche del tractor John Deere y por último tendremos acoplado el implemento (Arado de cinceles) con los tres puntos de enganche del transductor integral.

c) Se pone en movimiento el tractor, a una velocidad aproximada de 5 km/h(segunda velocidad rápida y a 2000 rpm; se espera que pase un promedio de 300 datos ya adquiridos para bajar el hidráulico del tractor Jhon Deere en conjunto con el transductor integral y el implemento (Arado de cinceles), en estado dinámico el transductor se deja que tenga un almacenamiento de información de 5000 datos, al llegar esta cantidad de datos adquiridos se procede a levantar el hidráulico del tractor, se deja que termine de almacenar los 7000 datos y se termina una corrida, este proceso se repite por 8 veces por cada diferente tipo de arreglo.

d) De acuerdo a la calibración de cada dinamómetro octagonal, se estará almacenando la cantidad de 30 datos/segundo, con un total de 7000 datos que son los datos requeridos en tiempo para terminar un recorrido de 100 m en estado dinámico del transductor integral.

e) Al término de cada repetición, automáticamente el programa lo guarda en la carpeta que nosotros habíamos destinado, se procede a revisar los datos graficando canal por canal en el programa de Excel para observar que en realidad está funcionando nuestro dinamómetro.

Análisis de información

La disposición de un equipo de adquisición de datos que registren los valores que se obtienen por medio de un transductor y los envíe a una computadora, hace posible almacenar en un archivo en disco los valores registrados durante la operación de la herramienta. Para el análisis de datos primeramente se abren los archivos en Excel y se grafican los canales, lo siguiente sería llevar a cero todas las gráficas restando el primer valor de la columna con todos los valores de la misma columna para tener una mayor percepción del comportamiento del transductor integral en un estado dinámico, ya hecho esta acción se procede a multiplicar a cada uno de las columnas por su constante correspondiente.

Este archivo puede ser leído por el programa "análisis5.m"(adjunto en el anexo II) el último dígito del nombre del programa se refiere a la cantidad de dinamómetros que puede procesar la frecuencia registrada, este se maneja en un ambiente de Matlab, que nos permita procesar toda la información contenida en él por medio de un análisis espectral se puede conocer las fuerzas que se presentan durante la operación del implemento. La información que se obtiene del sistema de adquisición de datos es de tipo dinámico porque varía con el tiempo, y es aleatorio porque no tiene un comportamiento definido, ya que depende de las fuerzas en la interacción suelo – implemento que son registradas durante la operación de la herramienta.

Para determinar que herramienta requiere la máxima fuerza y así poder dimensionar el dinamómetro, es necesario conocer la magnitud de las fuerzas de reacción del suelo y su frecuencia correspondiente, para lo cual se realiza un análisis espectral de los datos obtenidos. Un espectro es una relación típicamente representada por una gráfica de la magnitud o valor relativo de un parámetro contra frecuencia. Cada fenómeno físico, ya sea electromagnético, mecánico, hidráulico, térmico o de algún otro sistema tiene un espectro único asociado a él. Para conocer esta información se selecciona el algoritmo de la transformada rápida de Fourier incluido en el programa de Matlab, este algoritmo calcula el espectro de frecuencia de los datos obtenidos, y a partir de aquí se pueden localizar la mayor magnitud ocurrida y su correspondiente frecuencia (Mojica, 2000).

Una vez terminada las 8 repeticiones, se da a la tarea de hacer muestreos con el

perfilometro, para determinar la disturbación del suelo por el paso del implemento. Se hacen dos muestreos, uno a 30 m y el otro a 60 metros del inicio de la repetición, con una longitud de 1 m de largo por 0.5 metro de ancho; Se procede hacer una remoción de la tierra suelta hasta donde el suelo este firme, para alcanzar las huellas de los cinceles, ya obtenido las huellas de los cinceles se procede a tomar medidas con el perfilometro y finalmente capturar los datos en una hoja de Excel para su interpretación.

A continuación se muestra la recodificación del programa análisis (Mojica, 2000) llamado análisis 5 (Ing. Alexander Bonifaz del Carpio, Junio 2012), el cual puede leer los datos de 5 dinamómetros.

```

1  p=path;
2  incpath = ([...
3  'c:\edml\data\dcon' ,...
4  ';c:\edml\data\ddob' ,...
5  ';c:\edml\data\dgot' ,...
6  ';c:\edml\data\dlgd' ,...
7  ';c:\edml\data\dlich' ,...
8  ';c:\edml\data\dlig' ,...
9  ';c:\edml\data\dmdd' ,...
10 ';c:\edml\data\dmue' ,...
11 ';c:\edml\data\dond' ,...
12 ';c:\edml\data\cincel' ,...
13 ]);
14 path(p, incpath);
15 clear
16 clc
17 file=input('Nombre de archivo de datos sin extension : ',←
            's');
18 filename=[file '.dat'];
19 eval(['load ' filename]);
20 disp('Listo , archivo cargado')
21 x=eval(file);
22 v=x(:,1);
23 h=x(:,2);
24 z=x(:,3);
25 j=x(:,4);
26 m=x(:,5);
27 pas=input('Numero de corrida (1/4) : ','s');
28 disco=input('Titulo para las graficas : ','s');
```



```

29 cv=[ ' Comp. Vert.' pas ];
30 ch=[ ' Comp. Horiz.' pas ];
31 cz=[ ' Comp. Vert.' pas ];
32 cj=[ ' Comp. Horiz.' pas ];
33 cm=[ ' Comp. Horiz.' pas ];
34 disp('Trabajando con columna 1... ')
35 titulo=[disco cv ];
36 plot(v, '-r '); title (titulo); xlabel('Numero de muestra');↵
    ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
37 dv=input('Desplazamiento del inicio de valores con ↵
    respecto a cero : ');
38 v=v-dv;
39 signo=input('Multiplicar por -1 o por 1 : ');
40 v=v*signo;
41 disp('En este momento se graficaran los datos ajustados↵
    ...Pulsa una tecla... ')
42 pause 102
43 plot(v, '-r '); title (titulo); xlabel('Numero de muestra');↵
    ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
44 ini=input('Posicion inicial para el analisis :');
45 fin=input('Posicion final para el analisis :');
46 v=v(ini:fin);
47 medial=mean(v);
48 disp('La media del segmento de datos es: ');disp(medial)
49 disp('Este valor sera restado para desplazar los datos ↵
    hacia el cero ')
50 disp('Pulsa una tecla... ')
51 pause
52 v=v-medial;
53 plot(v, '-r '); title (titulo); xlabel('Numero de muestra');↵
    ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
54 disp('Ahora se obtendran las magnitudes y frecuencias ↵
    correspondientes. ')
55 disp('Esto puede tardar un poco. Pulsa una tecla... ')
56 pause
57 Pn1=(abs(fft(v))*2)/length(v);
58 f=(272/length(v))*(0:length(v)/2);
59 plot(f,Pn1(1:length(f)), '-r '); title (titulo); xlabel('↵
    Frecuencia (Hz)');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;↵
    zoom on
60 disp('Si no se aprecian los valores , definir un rango ↵
    entre 1 y el siguiente valor : ');disp(length(f))
61 resp=input('Definir nuevo rango (s n) ', 's');
62 if resp=='s '
63 ok=1;

```

```

64 while ok==1
65 a=input('Valor inicial : ');
66 b=input('Valor final : ');
67 plot(f(a:b),Pn1(a:b),'-r');title(titulo);xlabel('←
    Frecuencia (Hz)');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;←
    zoom on
68 resp=input(' Definir un nuevo rango (s/n)', 's');
69 ok=strcmp('s',resp);
70 end
71 end
72 maxpn1=max(Pn1);
73 disp('El valor maximo para Pn es : ');disp(maxpn1)
74 disp('A continuacion , se analizara la columna 2. Pulsa ←
    una tecla... ')
75 pause
76 disp('Trabajando con la columna 2... ')
77 titulo=[disco ch];
78 plot(h,'-r');title(titulo);xlabel('Numero de muestra');←
    ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
79 dh=input('Desplazamiento del inicio de valores con ←
    respecto a cero : ');
80 h=h-dh;
81 signo=input('Multiplicar por -1 o por 1 : ');
82 h=h*signo;
83 disp('En este momento se graficaran los datos ajustados←
    ...Pulsa una tecla... ')
84 pause
85 plot(h,'-r');title(titulo);xlabel('Numero de muestra');←
    ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
86 ini=input('Posicion inicial para el analisis : ');
87 fin=input('Posicion final para el analisis : ');
88 h=h(ini:fin); 103
89 media2=mean(h);
90 disp('La media del segmento de datos es: ');disp(media2)
91 disp('Este valor sera restado para desplazar los datos ←
    hacia el cero')
92 disp('Pulsa una tecla... ')
93 pause
94 h=h-media2;
95 plot(h,'-r');title(titulo);xlabel('Numero de muestra');←
    ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
96 disp('Ahora se obtendran las magnitudes y frecuencias ←
    correspondientes. ')
97 disp('Esto puede tardar un poco. Pulsa una tecla... ')
98 pause

```

```

99 Pn2=(abs(fft(h))*2)/length(h);
100 f=(272/length(h))*(0:length(h)/2);
101 plot(f,Pn2(1:length(f)),'-r');title(titulo);xlabel('←
    Frecuencia (Hz)');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;←
    zoom on
102 disp('Si no se aprecian los valores, definir un rango ←
    entre 1 y el siguiente valor : ');disp(length(f))
103 resp=input(' Definir nuevo rango (s/n) ','s');
104 if resp=='s'
105 ok=1;
106 while ok==1
107 a=input('valor inicial : ');
108 b=input('valor final : ');
109 plot(f(a:b),Pn2(a:b),'-r');title(titulo);xlabel('←
    Frecuencia (Hz)');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;←
    zoom on
110 resp=input(' Definir un nuevo rango (s/n) ','s');
111 ok=strcmp('s',resp);
112 end
113 end
114 maxpn2=max(Pn2);
115 disp('El valor maximo para Pn es : ');disp(maxpn2)
116 disp('A continuacion, se analizara la columna 3. Pulsa ←
    una tecla...')
117 pause
118 disp('Trabajando con la columna 3...')
119 titulo=[disco cz];
120 plot(z,'-r');title(titulo);xlabel('Numero de muestra');←
    ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
121 dz=input('Desplazamiento del inicio de valores con ←
    respecto a cero : ');
122 z=z-dz;
123 signo=input('Multiplicar por -1 o por 1 : ');
124 z=z*signo;
125 disp('En este momento se graficaran los datos ajustados←
    ...Pulsa una tecla...')
126 pause
127 plot(z,'-r');title(titulo);xlabel('Numero de muestra');←
    ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
128 ini=input('Posicion inicial para el analisis :');
129 fin=input('Posicion final para el analisis :');
130 z=z(ini:fin);
131 media3=mean(z);
132 disp('La media del segmento de datos es: ');disp(media3)
133 disp('Este valor sera restado para desplazar los datos ←

```

```

    hacia el cero ')
134 disp('Pulsa una tecla...')
135 pause 104
136 z=z-media3;
137 plot(z, '-r'); title(titulo); xlabel('Numero de muestra');↵
    ylabel('Magnitud en Volts'); grid on; zoom on
138 disp('Ahora se obtendran las magnitudes y frecuencias ↵
    correspondientes. ')
139 disp('Esto puede tardar un poco. Pulsa una tecla...')
140 pause
141 Pn3=(abs(fft(z))*2)/length(z);
142 f=(272/length(z))*(0:length(z)/2);
143 plot(f, Pn3(1:length(f)), '-r'); title(titulo); xlabel('↵
    Frecuencia (Hz)'); ylabel('Magnitud en Volts'); grid on;↵
    zoom on
144 disp('Si no se aprecian los valores, definir un rango ↵
    entre 1 y el siguiente valor: '); disp(length(f))
145 resp=input(' Definir nuevo rango (s/n) ', 's');
146 if resp=='s'
147 ok=1;
148 while ok==1
149 a=input('valor inicial: ');
150 b=input('valor final: ');
151 plot(f(a:b), Pn3(a:b), '-r'); title(titulo); xlabel('↵
    Frecuencia (Hz)'); ylabel('Magnitud en Volts'); grid on;↵
    zoom on
152 resp=input(' Definir un nuevo rango (s/n)', 's');
153 ok=strcmp('s', resp);
154 end
155 end
156 maxpn3=max(Pn3);
157 disp('El valor maximo para Pn es: '); disp(maxpn3)
158 disp('A continuacion, se analizara la columna 4. Pulsa ↵
    una tecla...')
159 pause
160 disp('Trabajando con la columna 4...')
161 titulo=[disco cj];
162 plot(j, '-r'); title(titulo); xlabel('Numero de muestra');↵
    ylabel('Magnitud en Volts'); grid on; zoom on
163 dj=input('Desplazamiento del inicio de valores con ↵
    respecto a cero: ');
164 j=j-dj;
165 signo=input('Multiplicar por -1 o por 1: ');
166 j=j*signo;
167 disp('En este momento se graficaran los datos ajustados↵

```

```

    ...Pulsa una tecla... ')
168 pause
169 plot(j, '-r'); title(titulo); xlabel('Numero de muestra');↵
    ylabel('Magnitud en Volts'); grid on; zoom on
170 ini=input('Posicion inicial para el analisis :');
171 fin=input('Posicion final para el analisis :');
172 j=j(ini:fin);
173 media4 =mean(j);
174 disp('La media del segmento de datos es: '); disp(media4)
175 disp('Este valor sera restado para desplazar los datos ↵
    hacia el cero')
176 disp('Pulsa una tecla... ')
177 pause
178 j=j-media4;
179 plot(j, '-r'); title(titulo); xlabel('Numero de muestra');↵
    ylabel('Magnitud en Volts'); grid on; zoom on
180 disp('Ahora se obtendran las magnitudes y frecuencias ↵
    correspondientes.') 105
181 disp('Esto puede tardar un poco. Pulsa una tecla... ')
182 pause
183 Pn4=(abs(fft(j))*2)/length(j);
184 f=(272/length(j))*(0:length(j)/2);
185 plot(f, Pn4(1:length(f)), '-r'); title(titulo); xlabel('↵
    Frecuencia (Hz)'); ylabel('Magnitud en Volts'); grid on;↵
    zoom on
186 disp('Si no se aprecian los valores, definir un rango ↵
    entre 1 y el siguiente valor: '); disp(length(f))
187 resp=input(' Definir nuevo rango (s/n) ', 's');
188 if resp=='s'
189 ok=1;
190 while ok==1
191 a=input('valor inicial : ');
192 b=input('valor final : ');
193 plot(f(a:b), Pn4(a:b), '-r'); title(titulo); xlabel('↵
    Frecuencia (Hz)'); ylabel('Magnitud en Volts'); grid on;↵
    zoom on
194 resp=input(' Definir un nuevo rango (s/n)', 's');
195 ok=strcmp('s', resp);
196 end
197 end
198 maxpn4=max(Pn4);
199 disp('El valor maximo para Pn es: '); disp(maxpn4)
200 disp('Trabajando con la columna 5... ')
201 titulo=[disco cm];
202 plot(m, '-r'); title(titulo); xlabel('Numero de muestra');↵

```

```

    ylabel('Magnitud en Volts'); grid on; zoom on
203 dm=input('Desplazamiento del inicio de valores con ←
    respecto a cero : ');
204 m=m-dm;
205 signo=input('Multiplicar por -1 o por 1 : ');
206 m=m*signo;
207 disp('En este momento se graficarán los datos ajustados←
    ... Pulsa una tecla... ')
208 pause
209 plot(m, '-r'); title(titulo); xlabel('Numero de muestra');←
    ylabel('Magnitud en Volts'); grid on; zoom on
210 ini=input('Posicion inicial para el analisis : ');
211 fin=input('Posicion final para el analisis : ');
212 m=m(ini:fin);
213 media5 =mean(m);
214 disp('La media del segmento de datos es: '); disp(media5)
215 disp('Este valor sera restado para desplazar los datos ←
    hacia el cero')
216 disp('Pulsa una tecla... ')
217 pause
218 m=m-media5;
219 plot(m, '-r'); title(titulo); xlabel('Numero de muestra');←
    ylabel('Magnitud en Volts'); grid on; zoom on
220 disp('Ahora se obtendrán las magnitudes y frecuencias ←
    correspondientes. ')
221 disp('Esto puede tardar un poco. Pulsa una tecla... ')
222 pause
223 Pn5=(abs(fft(m))*2)/length(m);
224 f=(272/length(m))*(0:length(m)/2);
225 plot(f, Pn5(1:length(f)), '-r'); title(titulo); xlabel('←
    Frecuencia (Hz)'); ylabel('Magnitud en Volts'); grid on;←
    zoom on
226 disp('Si no se aprecian los valores, definir un rango ←
    entre 1 y el siguiente valor : '); disp(length(f)) 106
227 resp=input(' Definir nuevo rango (s/n) ', 's');
228 if resp=='s'
229 ok=1;
230 while ok==1
231 a=input('valor inicial : ');
232 b=input('valor final : ');
233 plot(f(a:b), Pn5(a:b), '-r'); title(titulo); xlabel('←
    Frecuencia (Hz)'); ylabel('Magnitud en Volts'); grid on;←
    zoom on
234 resp=input(' Definir un nuevo rango (s/n) ', 's');
235 ok=strcmp('s', resp);

```

```
236 end
237 end
238 maxpn5=max(Pn5);
239 disp('El valor maximo para Pn es : ');disp(maxpn5)
240 pause
241 disp('valores de las medias ')
242 disp(media1)
243 disp(media2)
244 disp(media3)
245 disp(media4)
246 disp(media5)
247 pause
248 disp('valores del espectro ')
249 disp(maxpn1)
250 disp(maxpn2)
251 disp(maxpn3)
252 disp(maxpn4)
253 disp(maxpn5)
254 pause
255 disp(' Analisis terminado ')
```

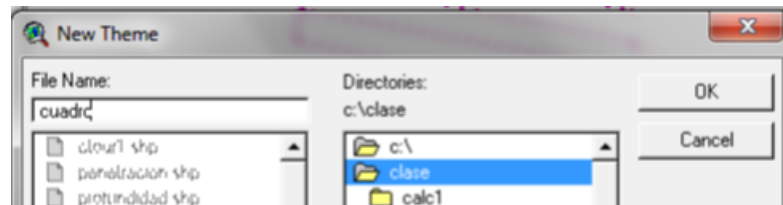
Anexo C

Generación de mapas de diagnóstico

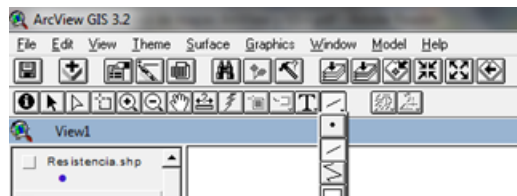
C.1 Secuencia para realización del mapeo en el programa Arc View 3.2 para el mapa de interpolación de la resistencia a la penetración del suelo

Ahora seleccionamos VIEW...NEW THEME.....y se selecciona tema de líneas.....

Y seleccionamos la carpeta de destino.....y ok...



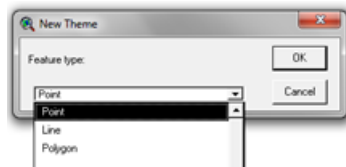
Y ahora se selecciona en el recuadro líneas....



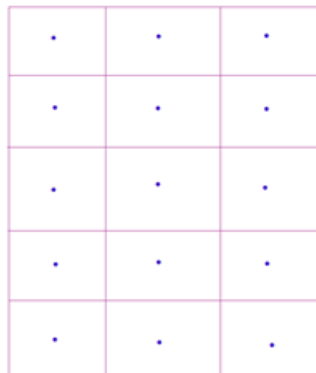
Y realizamos el recuadro de la forma de obtención de los puntos en campo



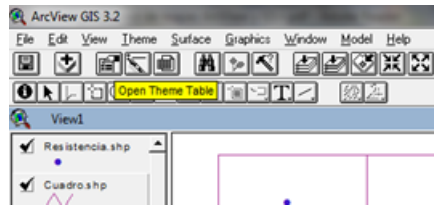
Ahora se genera un nuevo tema pero de puntos y se guarda en una carpeta. . . .



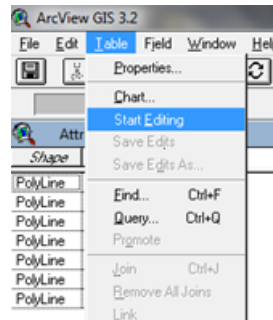
Dentro del cuadro se coloca el punto muestreado en campo.



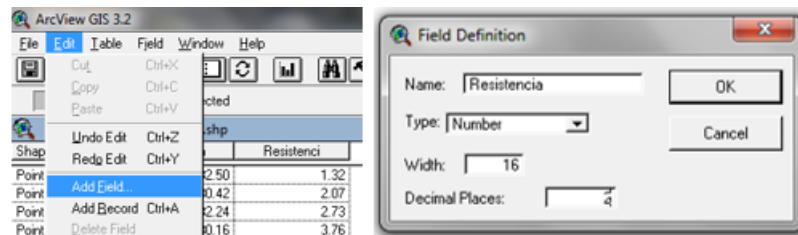
Una vez realizado los puntos se detiene la edición. y seleccionamos abrir la tabla del tema. . . .



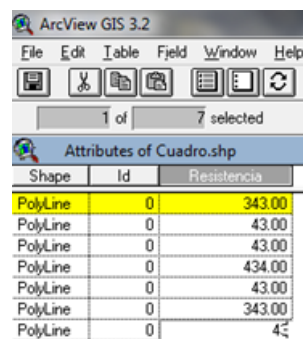
Ahora en tabla de damos empezar edición.....



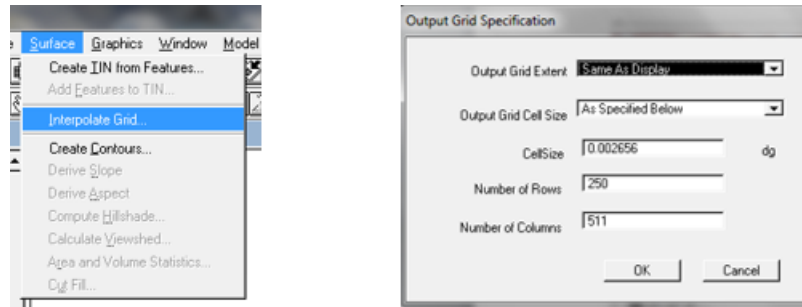
En edit..... agregamos un campo que sería el de resistencia a la penetración.....



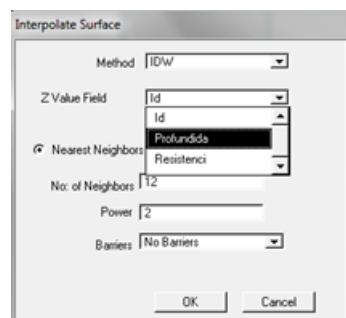
Y se genera el campo y ahora se procede a colocar los valores encontrados para cada punto.....



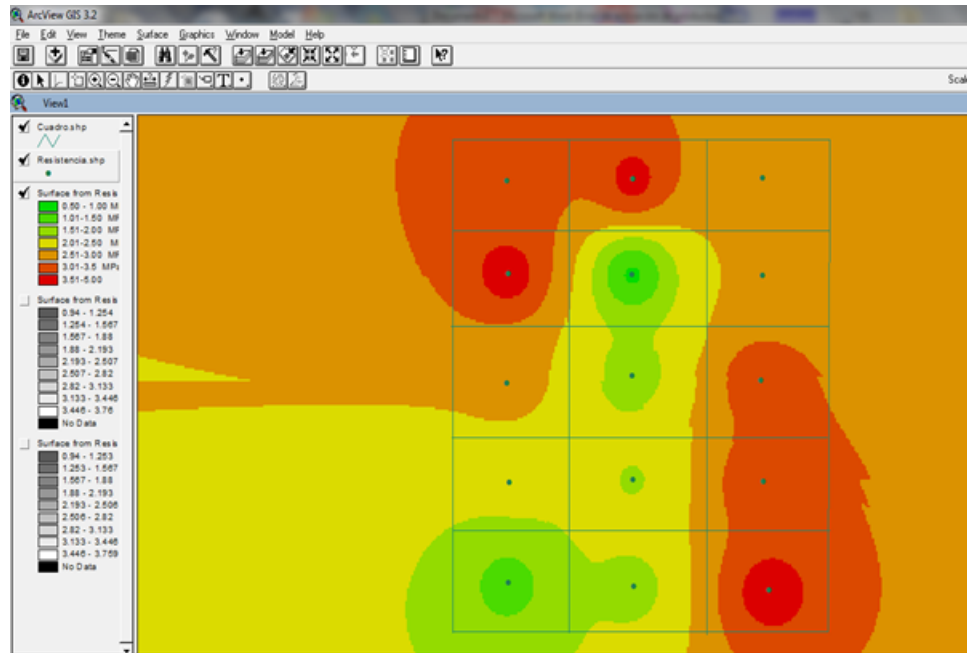
Una vez capturados los datos se procede a realizar la interpolación.seleccionamos surface. . .interpolate grid. . . .



Y para la variable Z seleccionamos el campo para el cual deseamos realizar la interpolación. . . que sería resistencia.ok. . .



Y se genera el mapa de interpolación para la variable resistencia a la penetración.



C.2 Secuencia para realización del mapeo en el programa Gs+ Versión 9 para % de Humedad y conductividad eléctrica.

Una vez abierto el programa capturamos los datos dentro de las celdas o también podemos copiar los datos desde EXCEL y pegamos en el programa.

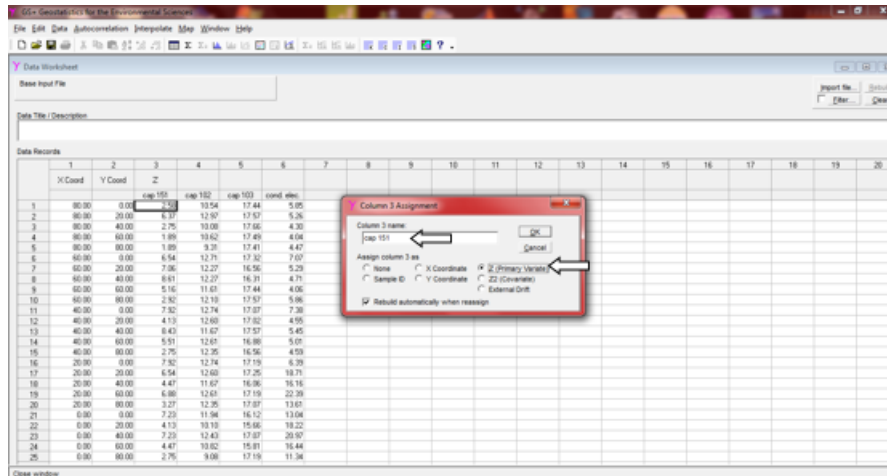
Captura de los datos en Gs+ Versión 9

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	X Coord	Y Coord	Z							
1	80.00	0.00	7.92	10.54	17.44	5.95				
2	80.00	20.00	6.37	12.97	17.57	5.26				
3	80.00	40.00	2.75	10.00	17.66	4.30				
4	80.00	60.00	1.89	10.62	17.85	4.06				
5	80.00	80.00	1.89	9.31	17.41	4.47				
6	80.00	0.00	8.54	12.71	17.32	7.07				
7	80.00	20.00	7.06	12.27	16.56	6.29				
8	80.00	40.00	8.61	12.27	16.21	4.71				
9	80.00	60.00	9.16	11.61	17.44	4.06				
10	80.00	80.00	2.92	12.10	17.57	5.06				
11	40.00	0.00	7.92	12.74	17.07	7.36				
12	40.00	20.00	4.13	12.60	17.02	4.95				
13	40.00	40.00	8.43	11.67	17.57	5.45				
14	40.00	60.00	6.51	12.61	16.86	5.01				
15	40.00	80.00	2.75	12.35	16.56	4.59				
16	20.00	0.00	7.92	12.74	17.19	6.29				
17	20.00	20.00	6.54	12.60	17.25	18.71				
18	20.00	40.00	4.47	11.67	16.06	16.16				
19	20.00	60.00	6.86	12.61	17.19	22.39				
20	20.00	80.00	3.27	12.35	17.07	13.61				
21	0.00	0.00	7.23	11.94	16.12	13.04				
22	0.00	20.00	4.13	10.10	15.66	16.22				
23	0.00	40.00	7.23	12.43	17.07	20.97				
24	0.00	60.00	4.47	10.62	15.91	16.44				
25	0.00	80.00	2.75	9.00	17.19	11.34				

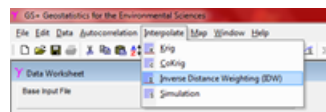
Cuadro C.1: Cuadro de datos % de humedad y conductividad eléctrica

X	Y	% humedad capacitor 151	% humedad capacitor 102	% humedad capacitor 103	conductividad eléctrica
80	0	2.5767	10.5404	17.4431	5.85256
80	20	6.3673	12.97352	17.569	5.25805
80	40	2.749	10.08008	17.65713	4.29551
80	60	1.8875	10.6226	17.49346	4.037889
80	80	1.8875	9.3074	17.40533	4.46537
60	0	6.5396	12.71048	17.3172	7.06989
60	20	7.0565	12.2666	16.5618	5.28636
60	40	8.6072	12.2666	16.31	4.714498
60	60	5.1612	11.609	17.4431	4.060537
60	80	2.9213	12.1022	17.569	5.855391
40	0	7.918	12.74336	17.0654	7.3813
40	20	4.1274	12.5954	17.01504	4.5503
40	40	8.4349	11.67476	17.569	5.453389
40	60	5.5058	12.61184	16.87655	5.006091
40	80	2.749	12.3488	16.5618	4.589934
20	0	7.918	12.74336	17.1913	6.39045
20	20	6.5396	12.5954	17.25425	18.7053
20	40	4.472	11.67476	16.0582	16.1574
20	60	6.8842	12.61184	17.1913	22.3856
20	80	3.2659	12.3488	17.0654	13.6095
0	0	7.2288	11.9378	16.12115	13.0433
0	20	4.1274	10.09652	15.65532	18.22403
0	40	7.2288	12.431	17.0654	20.9701
0	60	4.472	10.81988	15.8064	16.4405
0	80	2.749	9.07724	17.1913	11.3447

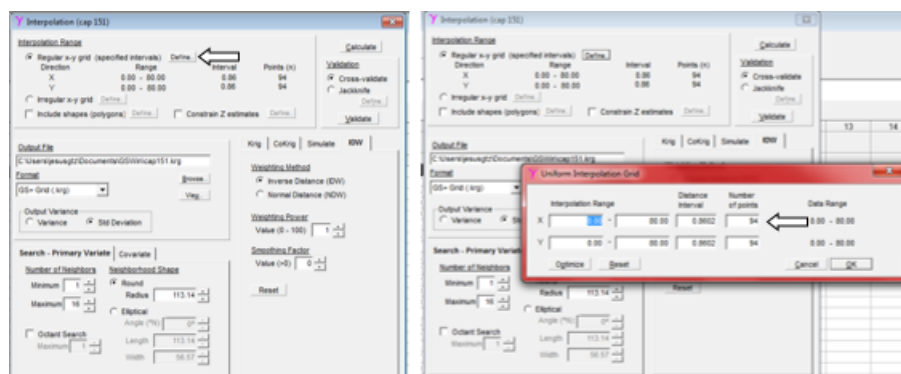
Una vez en Gs+ dar doble clic en la celda, cambiar a modo “z (primary variate)” para seleccionar el valor de la Z que nosotros vamos a utilizar y cambiar el nombre del archivo.



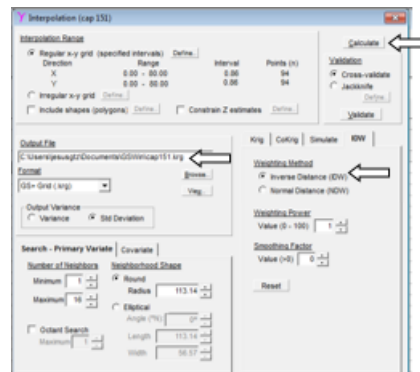
Ahora nosotros damos clic en interpólate y seleccionamos Inverse Distance Weighting (IDW).



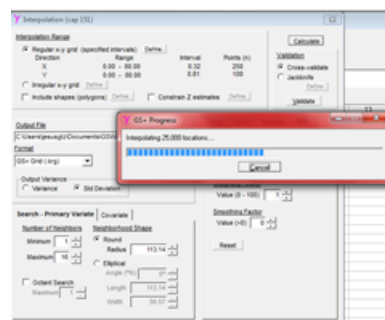
Se desplaza la ventana de Interpolation, dar clic en Define desplazando otra ventana Uniform Interpolation Grid y cambiar los Number of points, para X=250, para y=100 y dar Ok.



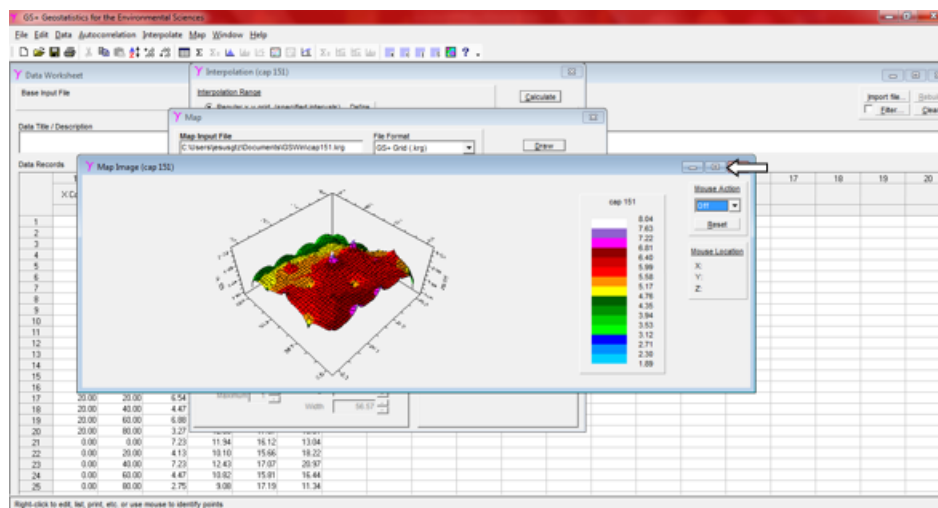
El programa regresa al menú anterior de interpolate se le define nombre del archivo en Output File, dar clic en IDW, clic Calculate.



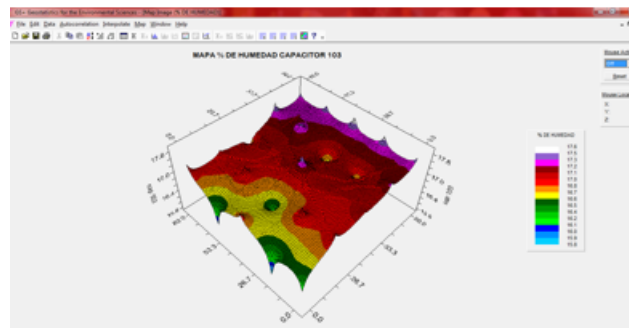
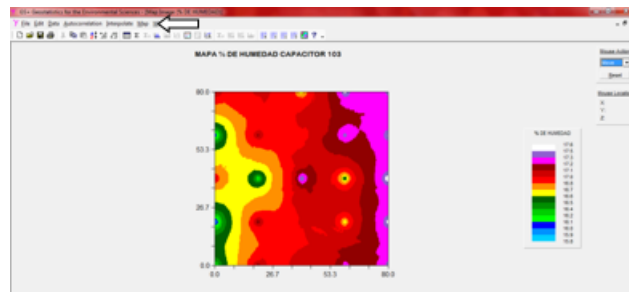
Se guardan los cambios en el programa



Se despliega la ventana del mapa y damos clic en maximizar.



Nos vamos en la barra de herramientas. . . . MAP y seleccionamos si queremos observar nuestro mapa en 2D O en 3D.



Anexo D

Planos de diseño del arado articulado

FIG. 1

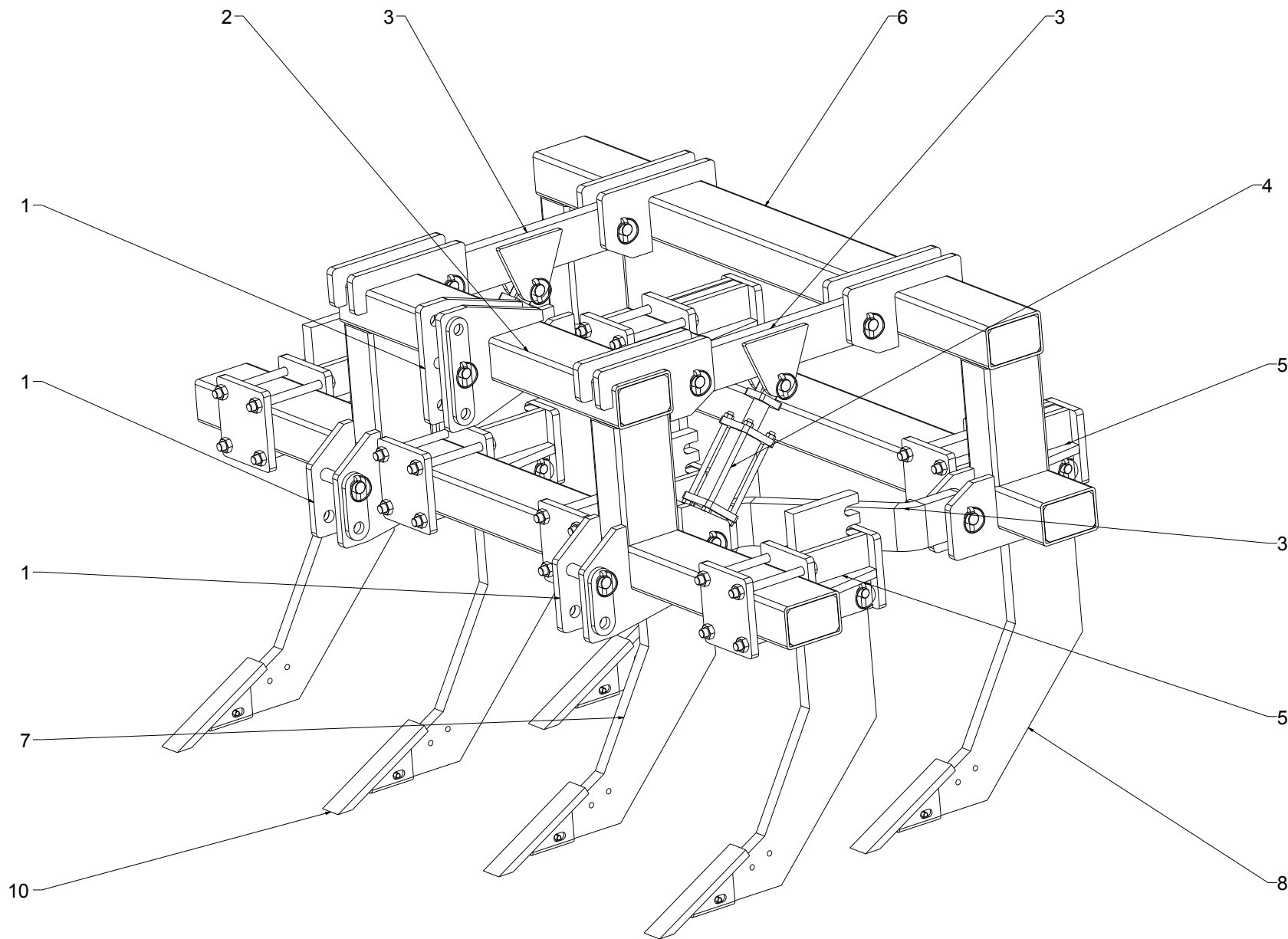


FIG. 2

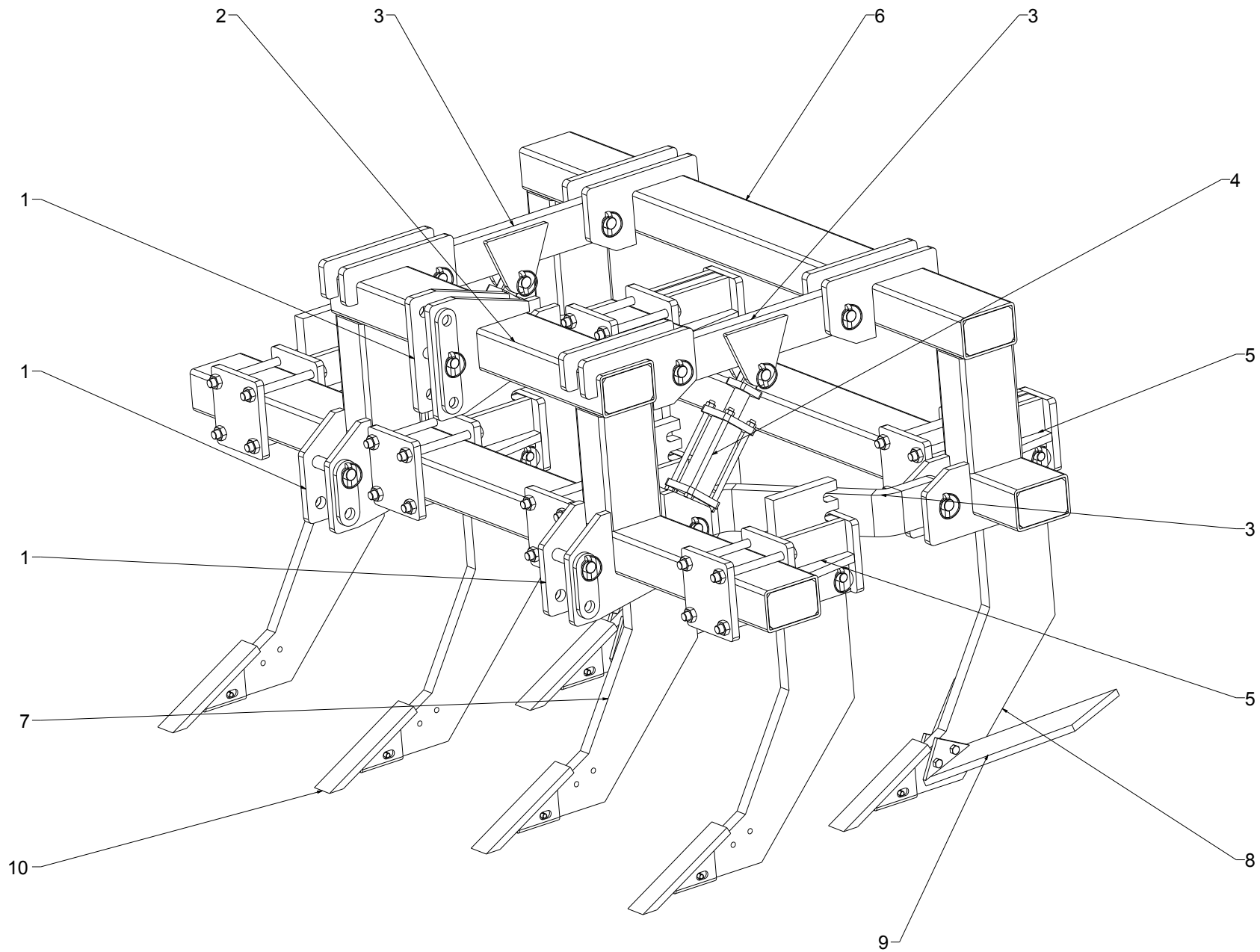


FIG. 3

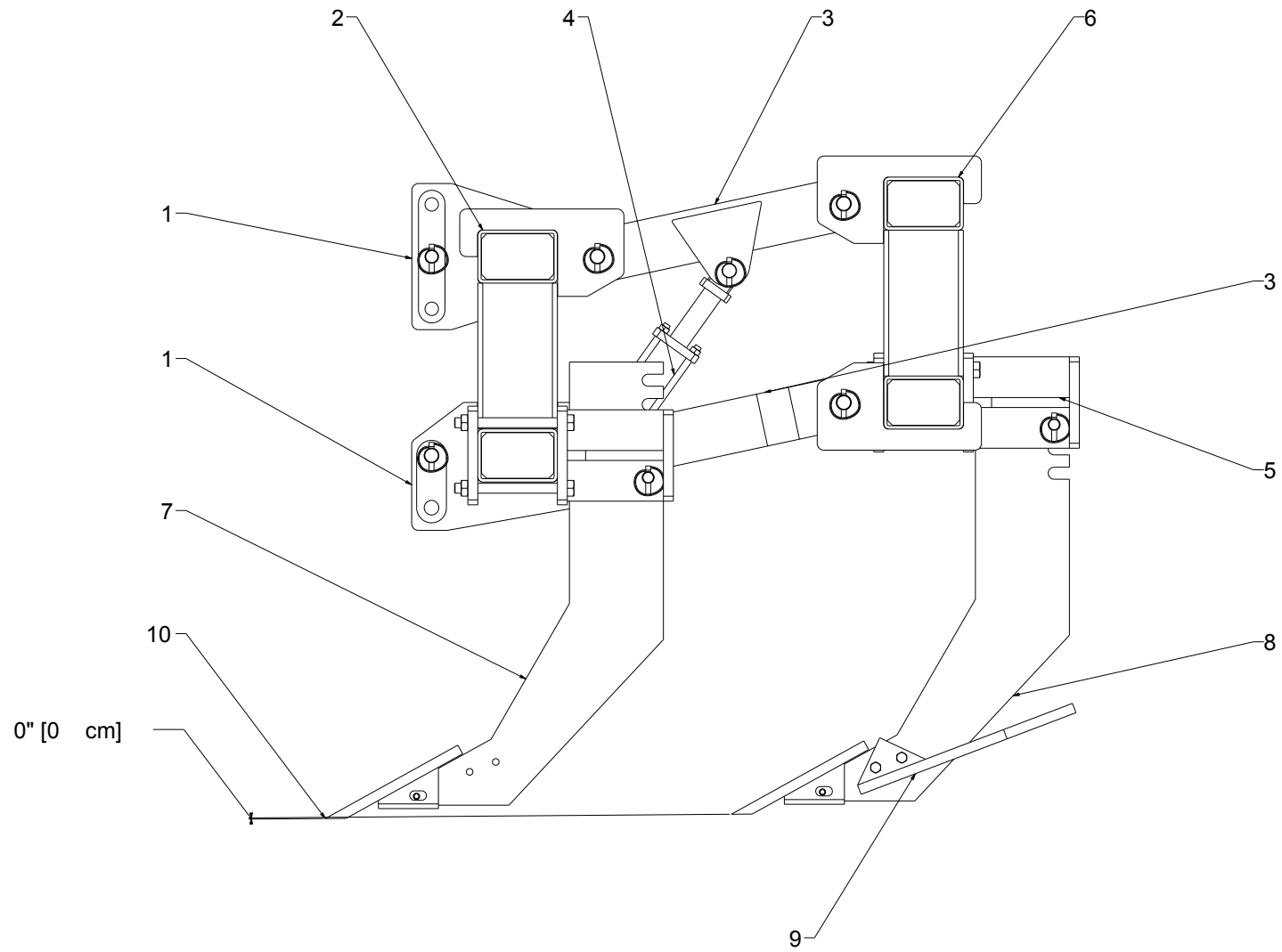


FIG. 4

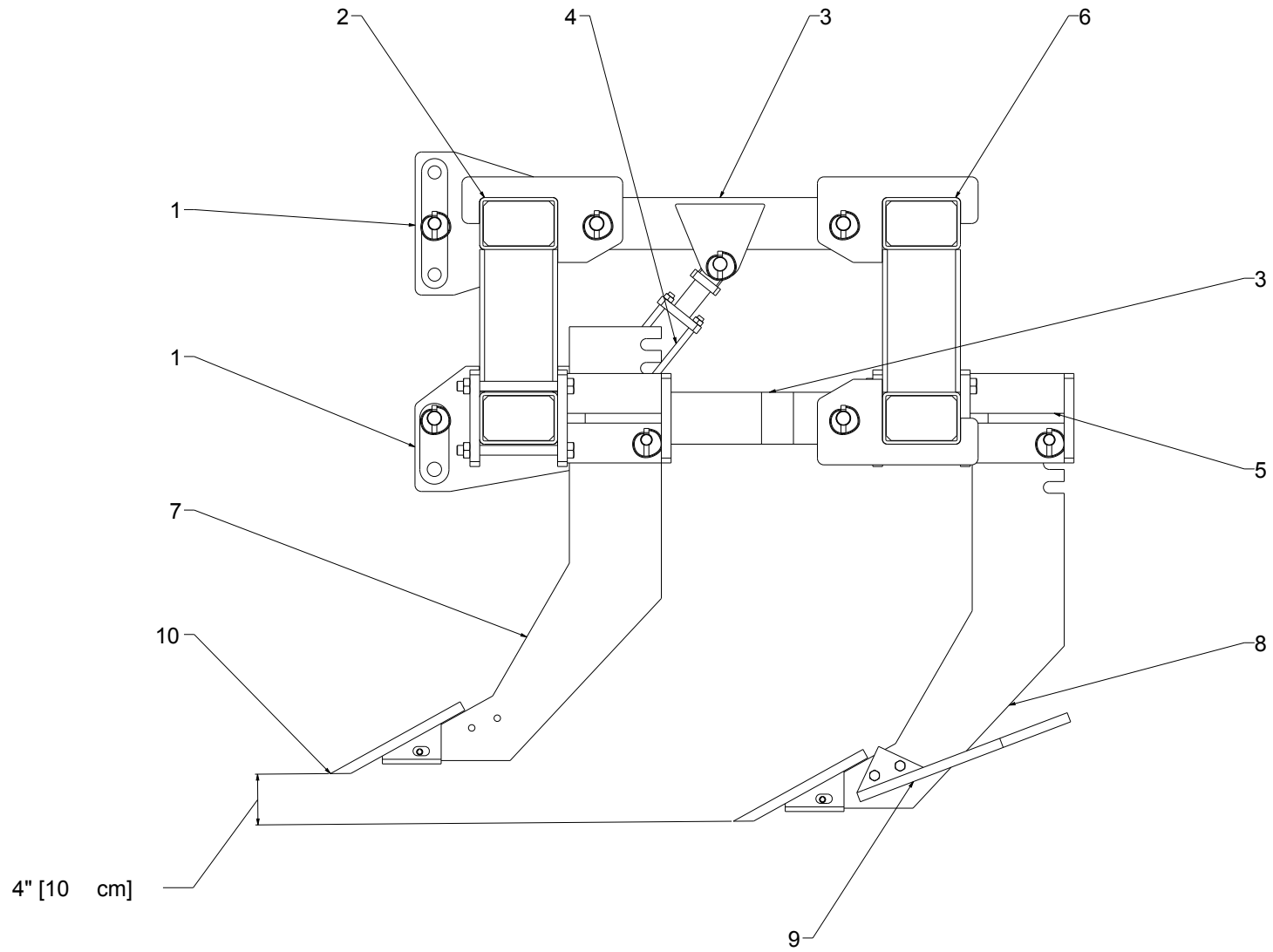
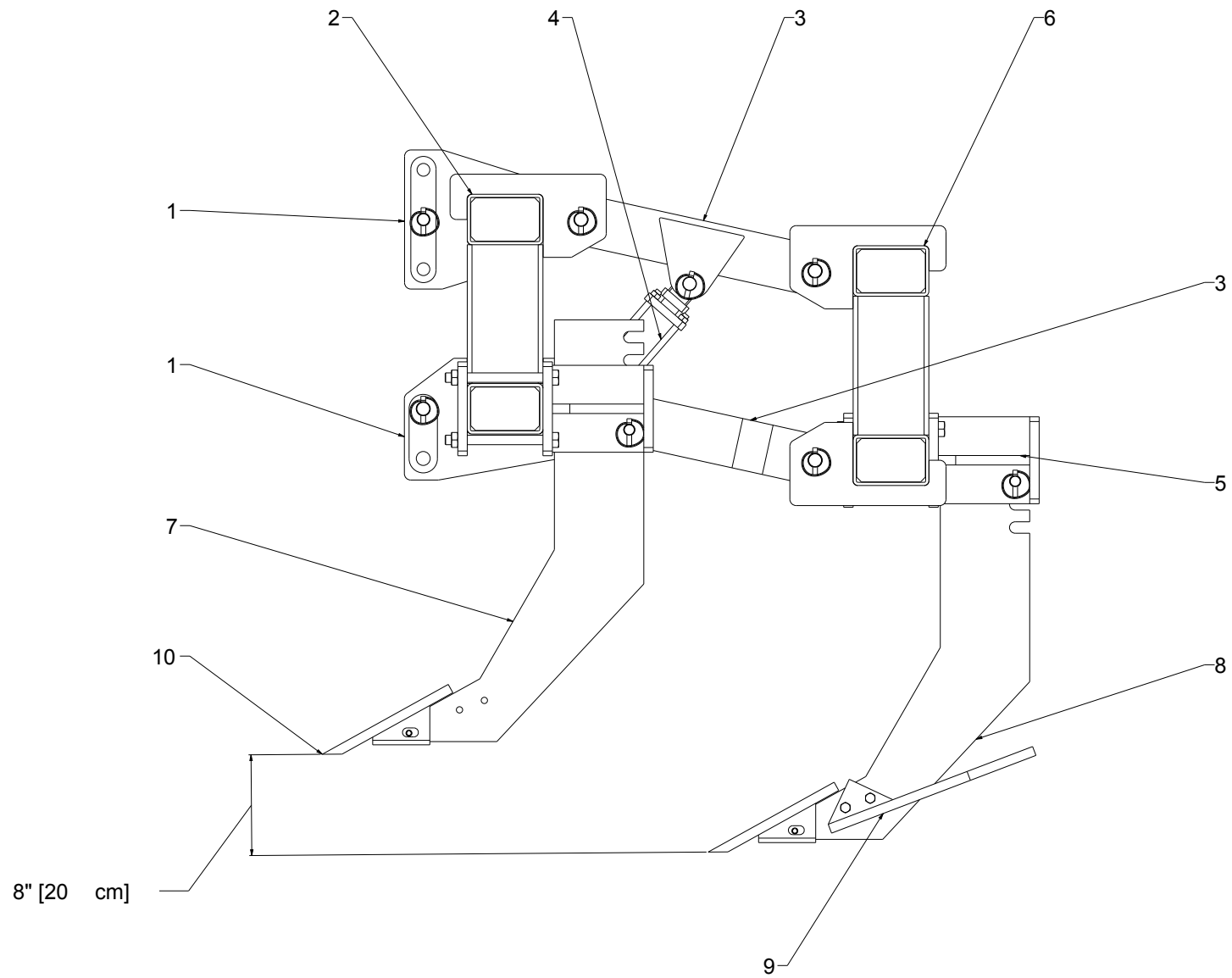



FIG. 5



Anexo E








Configuración del sistema de control

E.1 Agregar aplicaciones a la pantalla FmX

1. Encender la pantalla
2. Abrir pantalla de Configuración pulsando 
3. Para agregar el complemento *Survey* y *FieldLevel II*; presionar la siguiente secuencia de botones:
 - Pulsar Agregar/Quitar
 - buscar en la lista de complementos inactivos los complementos WM-Survey y FieldLevelIII
 - Seleccionar
 - OK




E.2 Configuración de la estación base RTK



E.2.1. Configuración del receptor

1. En la pantalla de inicio, presione . Utilice la pantalla del modo de funcionamiento para configurar los ajustes del sistema, la configuración de modo, o para ver el SV de estado (por satélite). Ajustes del modo es el valor predeterminado.
2. Presione . Base es la configuración predeterminada y no se puede cambiar.
3. Pulse  Usar la pantalla de *Estación Base* para seleccionar si el receptor se va a utilizar una posición “aquí” o si las coordenadas actuales en el receptor se cambiarán.
4. Pulse  Cuando **Editar actual** comienza a parpadear, el receptor está en Modo de edición y se puede cambiar la configuración actual.
5. Pulse  el ajuste cambia a *Nueva Base (Aquí)*.
6. Presione  para aceptar el cambio.
7. Pulse  de nuevo. Aparece la pantalla *Nombre de Base*.

E.2.2. Cambiando el nombre y la descripción de la estación base











En la pantalla de nombre base:

1. Pulse  Cuando el primer carácter del nombre base comience a parpadear, el receptor está en modo de edición y puede cambiar la configuración actual.
2. Pulse  o  para cambiar el valor del carácter.

3. Pulse  para mover el cursor al carácter siguiente.
4. Repita los pasos 2 a 3 para introducir el nombre de la estación base . El nombre puede tener hasta 16 caracteres. Pulse  para aceptar el cambio.











E.2.3. Configuración de la referencia latitud, longitud y altura de la estación base

En la pantalla de Latitud Base:

1. Si la estación base se estableció con posición *Aquí*, presione  para continuar. Para editar la Base de Latitud, pulse  para comenzar a editar y, a continuación, utilice el  y  las flechas para cambiar el valor del carácter para editar.
2. La pantalla *Base Longitud* se utiliza para cambiar la referencia longitud de la estación base. La base fue creada con posición *aquí*, así que pulse .
3. en la pantalla el punto de altura se utiliza para cambiar la altura de referencia de la estación base. la base fue creada con posición *aquí*, así que pulse .
4. Utilice la pantalla *Tipo de antena* para seleccionar el tipo de antena que se utiliza con el receptor. Pulse . Cuando la antena nombre comienza a parpadear , el receptor está en el modo de edición y puede seleccionar una antena.
5. Pulse  para desplazarse por los modelos de antena hasta que aparezca Zephyr Geodetic 2.
6. Pulse  para aceptar el cambio.
7. Pulse  de nuevo. La opción *Medido a* aparece en la pantalla. Ver la siguiente sección.

E.2.4. Medición y cambio de la altura de la antena

En la pantalla de medición:


1. Pulse . Cuando el método de medición de la antena comienza a parpadear, el receptor está en modo de edición y se puede seleccionar el método de medición de antena.
2. Pulse  para desplazarse a través de los métodos de medición hasta que aparece APC. Pulse  para aceptar el cambio.
3. Pulse .
4. Utilice en la pantalla *Altura de la antena* para cambiar la altura de la antena. Presione . Cuando el primer carácter de la altura de la antena comienza a parpadear, el receptor está en el modo de edición y podrá cambiar la altura de la antena. La altura de la antena se debe establecer en 0.00 para la mayoría de aplicaciones.
5. Pulse  o  para cambiar el valor del carácter.
6. Pulse  para mover el cursor al carácter siguiente.
7. Repita el paso 5 hasta el paso 6 para introducir la altura de la antena.
8. Presione  para aceptar el cambio.
9. Presione  de nuevo. Aparece la pantalla de salida.

Anexo F

Edición del plano de diseño (prescripción)

F.1 Levantamiento topográfico

1. Configurar el Levantamiento:

- Seleccionar la aplicación WM-Survey
- Pulsar Config 
- En la pestaña Configuraciones revisar que esté seleccionado:

Receptor: Internal Primary


Correcciones: CenterPoint RTK


Canal: 1

2. Pulsar OK

3. Pulsar nuevamente OK

4. Abrir la pantalla de ejecución

- Pulsar el botón 
- En la pantalla selección de configuración pulsar OK
- Llenar los datos en cada campo; Pulsar OK


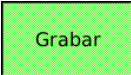
5. Seleccionar la aplicación de trabajo WM-Survey 

6. Definir el MBP (Master Bench Point).



- Posicionarse a un lado y al exterior de la parcela.

- Presionar el botón Punto Control.
- Esperar 30 segundos hasta que termine de promediar la ubicación del MBP

7. Definir la extensión de la parcela.

- Seleccionar Limite
- Pulsar 
- Conducir el vehículo por la orilla que definirá a la parcela.
- Pulsar 

8. Registrar la pendiente del terreno

- Seleccionar Interior
- Pulsar 
- Conducir el vehículo por el interior de la parcela, haciendo hileras de 5 m de espaciamento aproximadamente.
- Pulsar 

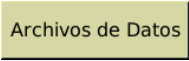

9. Pulsar 

10. Pulsar OK, en este punto se generan los mapas de altitud y cortes/rellenos

11. Pulsar el botón Inicio 

12. Pulsar Cerrar campo

13. Extraer los datos

- Insertar una memoria en el puerto USB (parte trasera de la pantalla)
- Pulsar 
- Seleccionar Datos de Campo; Pulsar Copiar
- Pulsar OK
- Apagar la pantalla pulsando 
- Extraer la memoria USB, la cual contendrá los archivos del levantamiento en la ruta: UnidadUSB>AgGPS/Data/Cliente/Finca/Parcela

F.2 Conversión de coordenadas

F.2.1. Conversión de coordenadas GMS.d a G.d

1. Se captura la base de datos del trazado a una hoja de cálculo de Excel

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	ID	G	M	S	G	M	S	Altitud
2	1	25	2	8.70198	-100	37	14.34083	1732.27
3	2	25	2	8.38608	-100	37	14.28193	1732.24
4	3	25	2	8.064888	-100	37	14.21033	1732.06
5	4	25	2	7.494972	-100	37	17.70593	1731.68
6	5	25	2	7.8036	-100	37	17.77843	1731.74
7	6	25	2	8.128068	-100	37	17.85335	1731.63
8	7	25	2	7.549728	-100	37	21.35892	1731.531
9	8	25	2	7.23336	-100	37	21.30269	1731.58
10	9	25	2	6.913608	-100	37	21.24109	1731.57
11	10	25	2	6.34398	-100	37	24.7386	1731.33
12	11	25	2	6.66312	-100	37	24.80401	1731.29
13	12	25	2	6.979848	-100	37	24.87655	1731.285
14	13	25	2	6.371412	-100	37	28.38407	1731.06
15	14	25	2	6.054288	-100	37	28.32697	1731.13
16	15	25	2	5.737308	-100	37	28.25148	1731.15

2. Para las coordenadas de latitud (Norte) se convierten los minutos y segundos a grados dividiendo entre 60 y 3600 respectivamente, se suman a los grados y se realiza el mismo procedimiento para los 15 puntos. En excel se introduce la fórmula que se muestra en la siguiente figura:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	ID	G	M	S	G	M	S	Altitud	Latitud	Longitud
2	1	25	2	8.70198	-100	37	14.34083	1732.27	25.03575	-100.621
3	2	25	2	8.38608	-100	37	14.28193	1732.24	25.03566	-100.621
4	3	25	2	8.064888	-100	37	14.21033	1732.06	25.03557	-100.621

3. Para las coordenadas de longitud (Oeste) se convierten los minutos y segundos a grados dividiendo entre 60 y 3600 respectivamente, se resta el resultado a los grados

por estar a la izquierda del meridiano de Greenwich. En la hoja de excel se introduce la fórmula indicada en la siguiente figura:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	ID	G	M	S	G	M	S	Altitud	Latitud	Longitud
2	1	25	2	8.70198	-100	37	14.34083	1732.27	25.03575	-100.621
3	2	25	2	8.38608	-100	37	14.28193	1732.24	25.03566	-100.621
4	3	25	2	8.064888	-100	37	14.21033	1732.06	25.03557	-100.621

F.2.2. Extracción de coordenadas del MBP

1. Las coordenadas del MBP se localizan en el archivo FieldLevel.xml generado por la pantalla FmX, localizado en la ruta:

UnidadUSB>AgGPS/Data/Cliente/Finca/Parcela

```

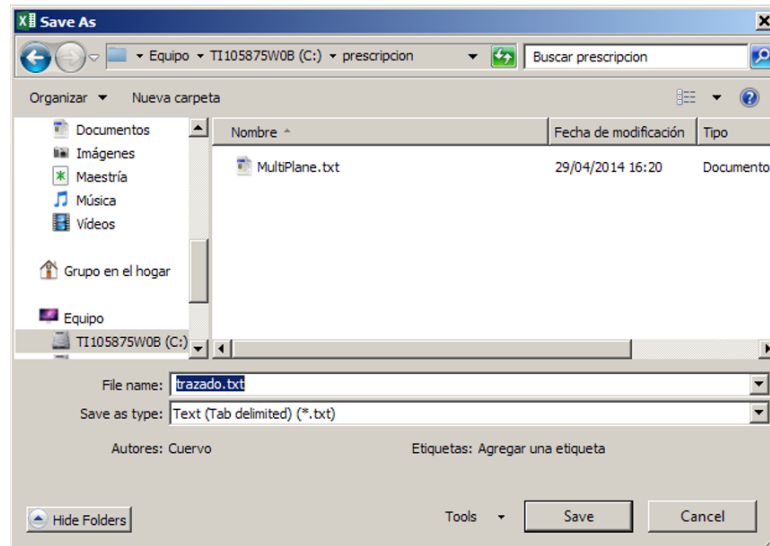
FieldLevel.xml: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?><field_level version="2"?>
<origin lat="25.03886931" lon="-100.6249794" alt="1884.71679">
  <gps_offset>
    <x>0</x>
    <y>0</y>
    <z>0</z>
  </gps_offset>
  <transform>
    <x>0</x>
    <y>0</y>
    <z>1.26</z>
  </transform>
</origin>
<survey>
  <benchmarks/>

```

2. La información de la ubicación del MBP se agrega a la base de datos del trazado.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	ID	G	M	S	G	M	S	Altitud	Latitud	Longitud
2	0	25	2	8.232	-100	37	25.59	1731	25.03562	-100.624
3	1	25	2	8.70198	-100	37	14.34083	1732.27	25.03575	-100.621
4	2	25	2	8.38608	-100	37	14.28193	1732.24	25.03566	-100.621
5	3	25	2	8.064888	-100	37	14.21033	1732.06	25.03557	-100.621
6	4	25	2	7.494972	-100	37	17.70593	1731.68	25.03542	-100.622

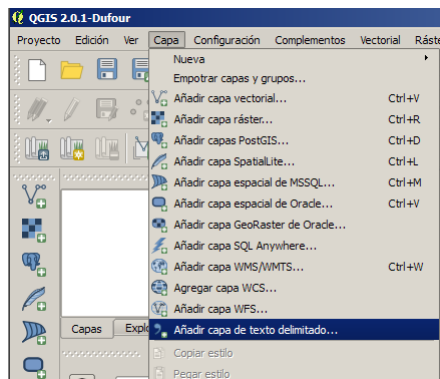
3. La base de datos se guarda como Archivo de Texto (delimitado por tabulaciones)(* .txt).



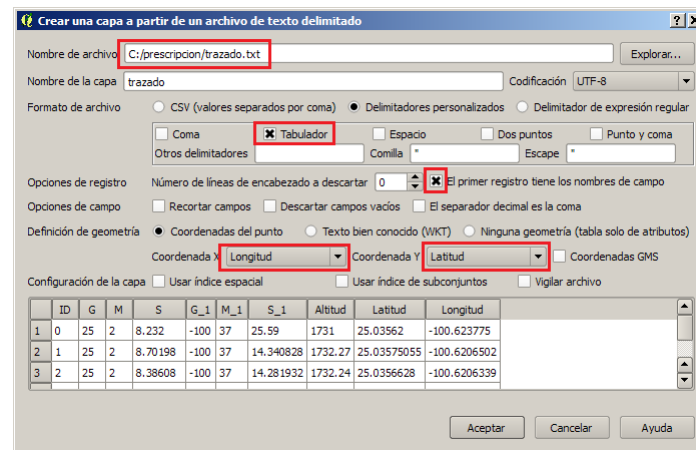
F.2.3. Conversión de coordenadas geográficas a UTM

Para la conversión se utilizó el software QGIS Desktop 2.0.1.

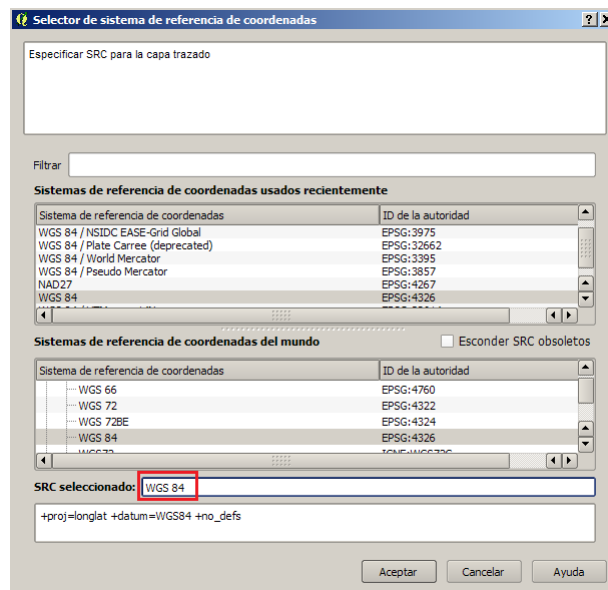
1. Añadir capa de texto delimitado



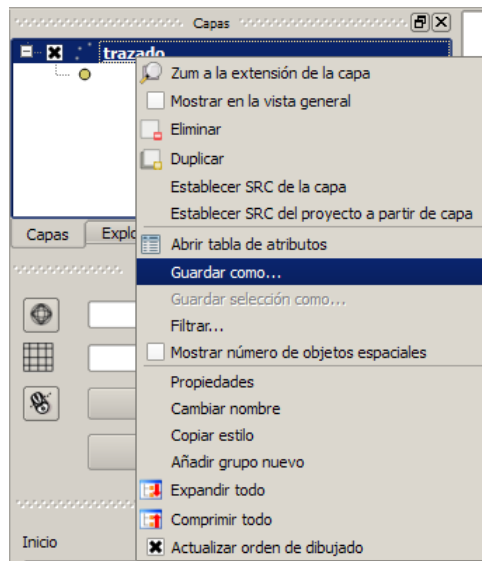
2. Definir los parámetros para la creación de una capa a partir del archivo de texto.



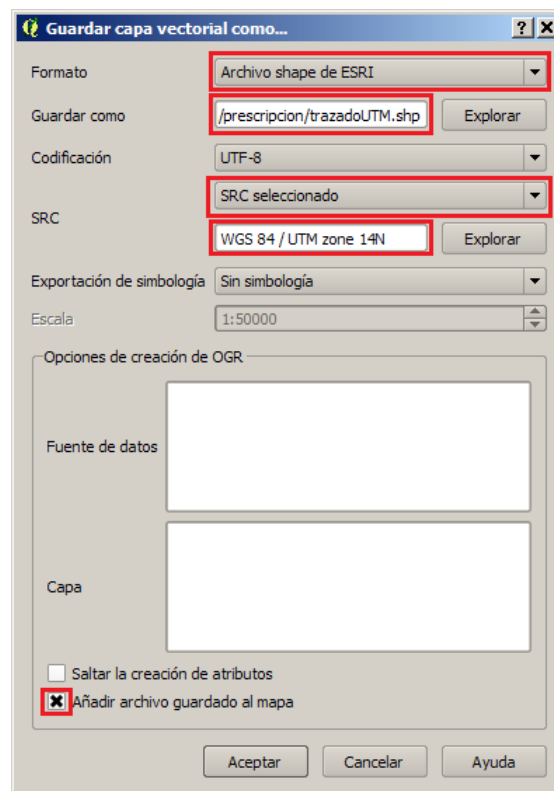
3. Seleccionar el sistema de referencia de coordenadas.



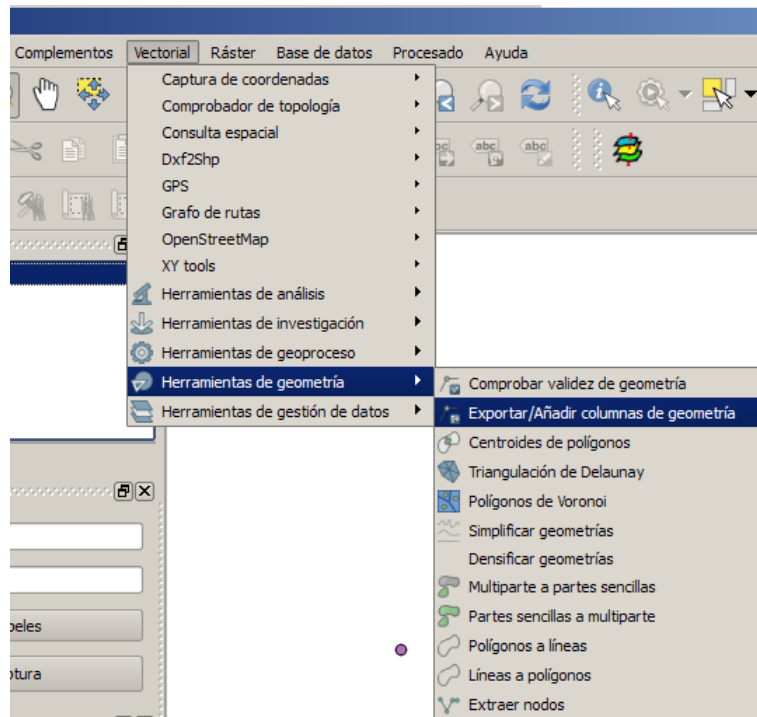
4. Dar clic derecho sobre la capa y seleccionar *Guardar como...* del menú desplegable.



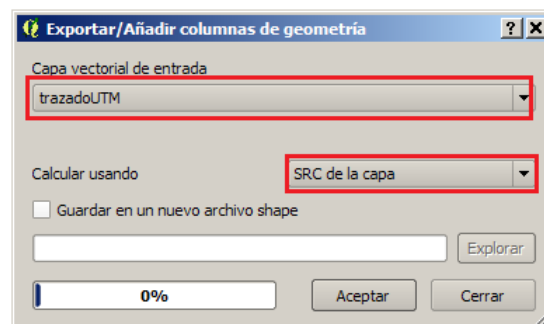
5. Especificar un nombre para la capa, Seleccionar el SRC *WGS84/UTM zone 14N*, activar la casilla de verificación *Añadir archivo guardado al mapa*



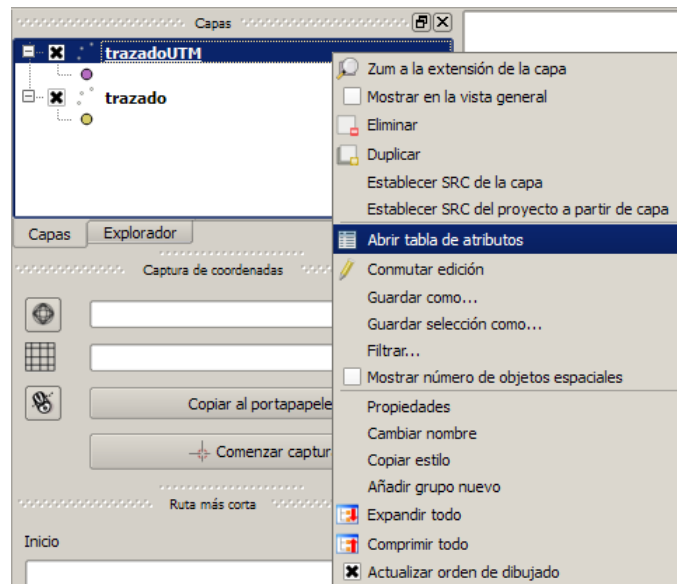
6. Para agregar las columnas de ubicación en coordenadas UTM a la tabla de atributos de la capa vectorial recién creada abrir la herramienta de geometría: *Exportar/añadir columnas de geometría*.



7. Seleccionar la capa con coordenadas UTM y seleccionar la opción *SRC de la capa*




8. Abrir la tabla de atributos



9. Pulsar la secuencia de botones:

- Deseleccionar todo.
- Invertir selección.
- Copiar las filas seleccionadas al portapapeles.

	Altitud	Latitud	Longitud	XCOORD	YCOORD
0	1731.000000000...	25.03562000000...	-100.623774999...	336178.432249	2769874.445635
1	1732.269999999...	25.03575054999...	-100.620650200...	336493.918744	2769885.126102
2	1732.240000000...	25.03566280000...	-100.620633900...	336495.447155	2769875.387416
3	1732.059999999...	25.03557358000...	-100.620614000...	336497.336883	2769865.481568
4	1731.680000000...	25.03541527000...	-100.621584999...	336399.146381	2769849.120970
5	1731.740000000...	25.03550100000...	-100.621605099...	336397.231907	2769858.640532
6	1731.630000000...	25.03559113000...	-100.621625899...	336395.252641	2769868.648275
7	1731.530999999...	25.03543047999...	-100.622599699...	336296.776344	2769852.032619
8	1731.579999999...	25.03534260000...	-100.622584099...	336298.233813	2769842.280353
9	1731.569999999...	25.03525378000...	-100.622567000...	336299.841398	2769832.422160
10	1731.329999999...	25.03509555000...	-100.623538499...	336201.599982	2769816.072422
11	1731.289999999...	25.03518420000...	-100.623556699...	336199.881241	2769825.913132
12	1731.285000000...	25.03527218000...	-100.623576799...	336197.969889	2769835.681934
13	1731.059999999...	25.03510316999...	-100.624551100...	336099.431456	2769818.142344
14	1731.130000000...	25.03501508000...	-100.624535300...	336100.908694	2769808.366548
15	1731.150000000...	25.03492702999...	-100.624514300...	336102.910706	2769798.588886

10. En una hoja de cálculo nueva de Excel seleccionar la casilla A1 y pegar 

I	J	K	L	M
Altitud	Latitud	Longitud	XCOORD	YCOORD
1731	25.03562	-100.624	336178.4	2769874
1732.27	25.03575	-100.621	336493.9	2769885
1732.24	25.03566	-100.621	336495.4	2769875
1732.06	25.03557	-100.621	336497.3	2769865
1731.68	25.03542	-100.622	336399.1	2769849
1731.74	25.0355	-100.622	336397.2	2769859
1731.63	25.03559	-100.622	336395.3	2769869
1731.531	25.03543	-100.623	336296.8	2769852

11. Generar las coordenadas y alturas relativas al MBP(fila 2) restandole las coordenadas UTM y altura del MBP a cada punto del trazado.

H	I	J	K	L	M	N	O
Altitud	Latitud	Longitud	XCOORD	YCOORD	xrel	yrel	altrel
1731	25.03562	-100.623775	336178.4322	2769874.446	0	0	0
1732.27	25.03575055	-100.6206502	336493.9187	2769885.126	315.486495	10.680467	1.27
1732.24	25.0356628	-100.6206339	336495.4472	2769875.387	317.014906	0.941781	1.24
1732.06	25.03557358	-100.620614	336497.3369	2769865.482	318.904634	-8.964067	1.06
1731.68	25.03541527	-100.621585	336399.1464	2769849.121	220.714132	-25.324665	0.68
1731.74	25.035501	-100.6216051	336397.2319	2769858.641	218.799658	-15.805103	0.74
1731.63	25.03559113	-100.6216259	336395.2526	2769868.648	216.820392	-5.79736	0.63
1731.531	25.03543048	-100.6225997	336296.7763	2769852.033	118.344095	-22.413016	0.531
1731.58	25.0353426	-100.6225841	336298.2338	2769842.28	119.801564	-32.165282	0.58
1731.57	25.03525378	-100.622567	336299.8414	2769832.422	121.409149	-42.023475	0.57
1731.33	25.03509555	-100.6235385	336201.6	2769816.072	23.167733	-58.373213	0.33
1731.29	25.0351842	-100.6235567	336199.8812	2769825.913	21.448992	-48.532503	0.29
1731.285	25.03527218	-100.6235768	336197.9699	2769835.682	19.53764	-38.763701	0.285
1731.06	25.03510317	-100.6245511	336099.4315	2769818.142	-79.000793	-56.303291	0.06
1731.13	25.03501508	-100.6245353	336100.9087	2769808.367	-77.523555	-66.079087	0.13
1731.15	25.03492703	-100.6245143	336102.9107	2769798.589	-75.521543	-75.856749	0.15

E.3 Alturas de Prescripción

1. Generar tres columnas:

- **Profundidad:** La cual contendrá la profundidad a la que se encuentra la capa

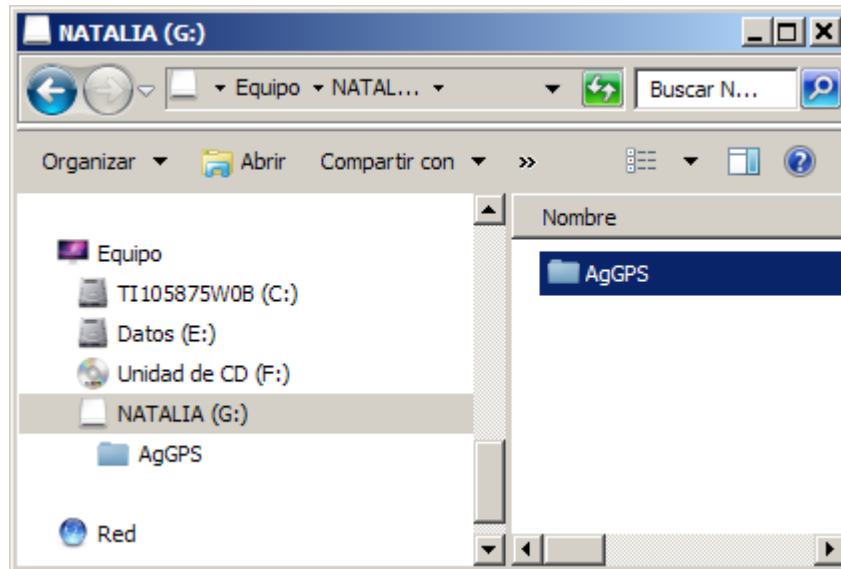
compactada, en este ejemplo se hicieron las prescripciones de forma aleatoria de 0.20, 0.30 y 0.40 m de profundidad

- **Ajuste:** En esta columna se define la distancia que será sumada a las alturas relativas de los puntos, tomando en cuenta que la profundidad -0.30 es la referencia; se suma 0.30 a la columna de *Profundidad*.
- **Prescripción:** En esta columna se reflejan las alturas de prescripción y se obtienen de la suma de la columna de alturas relativas con la columna de ajuste.

	M	N	O	P	Q	R
1	xrel	yrel	altrel	Profundidad	Ajuste	Prescripción
2	0	0	0			
3	315.486495	10.680467	1.27	-0.4	-0.1	1.17
4	317.014906	0.941781	1.24	-0.3	0	1.24
5	318.904634	-8.964067	1.06	-0.2	0.1	1.16
6	220.714132	-25.324665	0.68	-0.2	0.1	0.78
7	218.799658	-15.805103	0.74	-0.4	-0.1	0.64
8	216.820392	-5.79736	0.63	-0.4	-0.1	0.53
9	118.344095	-22.413016	0.531	-0.3	0	0.531
10	119.801564	-32.165282	0.58	-0.3	0	0.58
11	121.409149	-42.023475	0.57	-0.2	0.1	0.67
12	23.167733	-58.373213	0.33	-0.2	0.1	0.43
13	21.448992	-48.532503	0.29	-0.4	-0.1	0.19
14	19.53764	-38.763701	0.285	-0.3	0	0.285
15	-79.000793	-56.303291	0.06	-0.4	-0.1	-0.04
16	-77.523555	-66.079087	0.13	-0.3	0	0.13
17	-75.521543	-75.856749	0.15	-0.2	0.1	0.25

F.3.1. Adición de los puntos del Trazado (relativas) a la base Multipane.txt

1. Se copia la carpeta AgGPS que contiene el levantamiento topográfico a la carpeta de trabajo, para no afectar la base de datos original e identificar la nueva base con los puntos de control.



2. Abrir con Excel el archivo Multiplane.txt que se encuentra en la ruta:

unidad:\carpetaDeTrabajo\AgGPS\Data\UAAAN\NAVIDAD\Parcela1

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	1	0	0	0 MB N25:2		0				
2	2	-0.82	20.63	0.026418 B						
3	3	-0.82	21.03	0.026911 B						
4	4	-0.82	28.83	0.036536 B						
5	5	-0.82	36.83	0.046417 B						
6	6	-0.82	44.83	0.056308 B						
7	7	-0.82	53.03	0.066458 B						
8	8	-0.82	61.63	0.077113 B						
9	9	-0.82	71.23	0.089022 B						

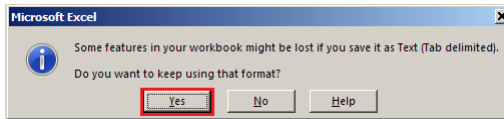
3. Insertar los puntos del trazado a la base Multiplane, copiando las columnas de coordenadas relativas y alturas de prescripción

	M	N	O	P	Q	R		A	B	C	D	E	F
1	xrel	yrel	altrel	Profundidad	Ajuste	Prescripción		1	1	0	0	0 MB N25:2	0
2	0	0	0					2	315.4865	10.68047	1.17		
3	315.486495	10.680467	1.27	-0.4	-0.1	1.17		3	317.0149	0.941781	1.24		
4	317.014906	0.941781	1.24	-0.3	0	1.24		4	318.9046	-8.96407	1.16		
5	318.904634	-8.964067	1.06	-0.2	0.1	1.16		5	220.7141	-25.3247	0.78		
6	220.714132	-25.324665	0.68	-0.2	0.1	0.78		6	218.7997	-15.8051	0.64		
7	218.799658	-15.805103	0.74	-0.4	-0.1	0.64		7	216.8204	-5.79736	0.53		
8	216.820392	-5.79736	0.63	-0.4	-0.1	0.53		8	118.3441	-22.413	0.531		
9	118.344095	-22.413016	0.531	-0.3	0	0.531		9	119.8016	-32.1653	0.58		
10	119.801564	-32.165282	0.58	-0.3	0	0.58		10	121.4091	-42.0235	0.67		
11	121.409149	-42.023475	0.57	-0.2	0.1	0.67		11	23.16773	-58.3732	0.43		
12	23.167733	-58.373213	0.33	-0.2	0.1	0.43		12	21.44899	-48.5325	0.19		
13	21.448992	-48.532503	0.29	-0.4	-0.1	0.19		13	19.53764	-38.7637	0.285		
14	19.53764	-38.763701	0.285	-0.3	0	0.285		14	-79.0008	-56.3033	-0.04		
15	-79.000793	-56.303291	0.06	-0.4	-0.1	-0.04		15	-77.5236	-66.0791	0.13		
16	-77.523555	-66.079087	0.13	-0.3	0	0.13		16	-75.5215	-75.8567	0.25		
17	-75.521543	-75.856749	0.15	-0.2	0.1	0.25		17	2	-0.82	20.63	0.026418 B	
18								18	3	-0.82	21.03	0.026911 B	
19								19	4	-0.82	28.83	0.036536 B	
20								20	5	-0.82	36.83	0.046417 B	
21								21	6	-0.82	44.83	0.056308 B	
22								22	7	-0.82	53.03	0.066458 B	
23								23	8	-0.82	61.63	0.077113 B	
24								24	9	-0.82	71.23	0.089022 B	
25								25	10	-0.82	79.63	0.099454 B	
26								26	11	-0.82	88.03	0.109897 B	
27								27	12	-0.82	96.43	0.120351 B	
28								28	13	-0.82	104.83	0.130816 B	
29								29	14	-0.82	113.23	0.141292 B	
30								30	15	-0.82	121.63	0.151770 B	

4. Ajustar la numeración de la columna A y etiquetar los puntos de control con BM y un número progresivo.

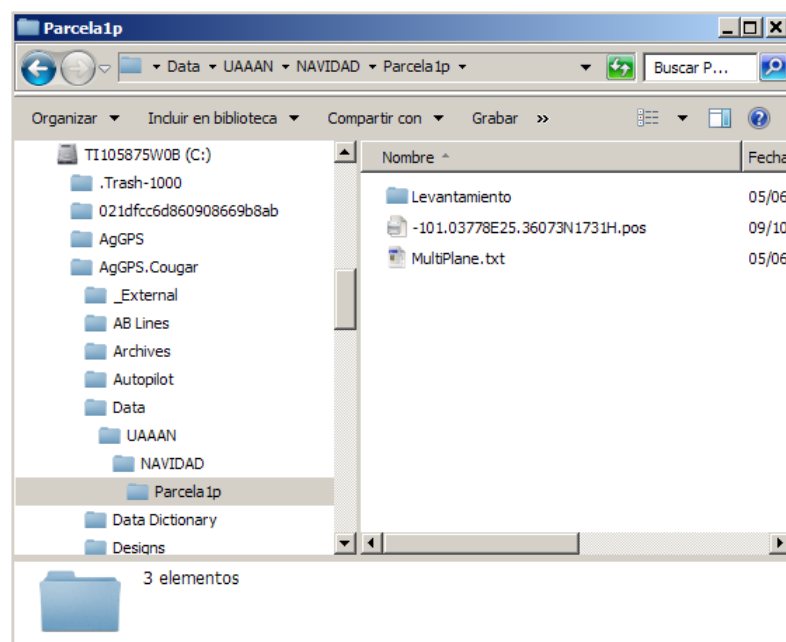
	A	B	C	D	E
1	1	0	0	0	0 MB N25:2
2	2	315.486	10.6805	1.17	BM1
3	3	317.015	0.94178	1.24	BM2
4	4	318.905	-8.96407	1.16	BM3
5	5	220.714	-25.3247	0.78	BM4
6	6	218.8	-15.8051	0.64	BM5
7	7	216.82	-5.79736	0.53	BM6
8	8	118.344	-22.413	0.531	BM7
9	9	119.802	-32.1653	0.58	BM8
10	10	121.409	-42.0235	0.67	BM9
11	11	23.1677	-58.3732	0.43	BM10
12	12	21.449	-48.5325	0.19	BM11
13	13	19.5376	-38.7637	0.285	BM12
14	14	-79.0008	-56.3033	-0.04	BM13
15	15	-77.5236	-66.0791	0.13	BM14
16	16	-75.5215	-75.8567	0.25	BM15
17	17	-0.82	20.63	0.02642	B
18	18	-0.82	21.03	0.02691	B
19	19	-0.82	28.83	0.03654	B
20	20	-0.82	36.83	0.04642	B
21	21	-0.82	44.83	0.05631	B
22	22	-0.82	53.03	0.06646	B


5. Pulsar Guardar y Si (seguir usando el formato)



F.3.2. Procesado en el simulador de la pantalla FmX

1. Cambiar el nombre de la carpeta del campo donde se encuentra la base MultiPlane.txt modificada en el apéndice anterior. En este ejemplo se cambió de Parcela1 a Parcela1p
2. Copiar la carpeta de *Cliente*(UAAAN) a la carpeta de datos del simulador:
unidad:\AgGPS.cougar\Data
3. Eliminar los archivos de la carpeta campo (parcela1p):
 - cutfillmap.png
 - EventHistory.dbf
 - field.xml
 - FieldLevel.xml
 - heightmap.png



4. Abrir el simulador y presionar 
5. Pulsar OK en la selección de configuración
6. En la ventana *Selección de Campo* verificar que se encuentre el campo parcela1p



Selección de Campo

Selección de Campo

Cliente: UAAAN [▼] Nueva

Finca: NAVIDAD [▼] Nueva

Campo: Parcela1p [▼] Nueva

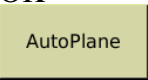

Evento: Levantamiento [▼] Nueva

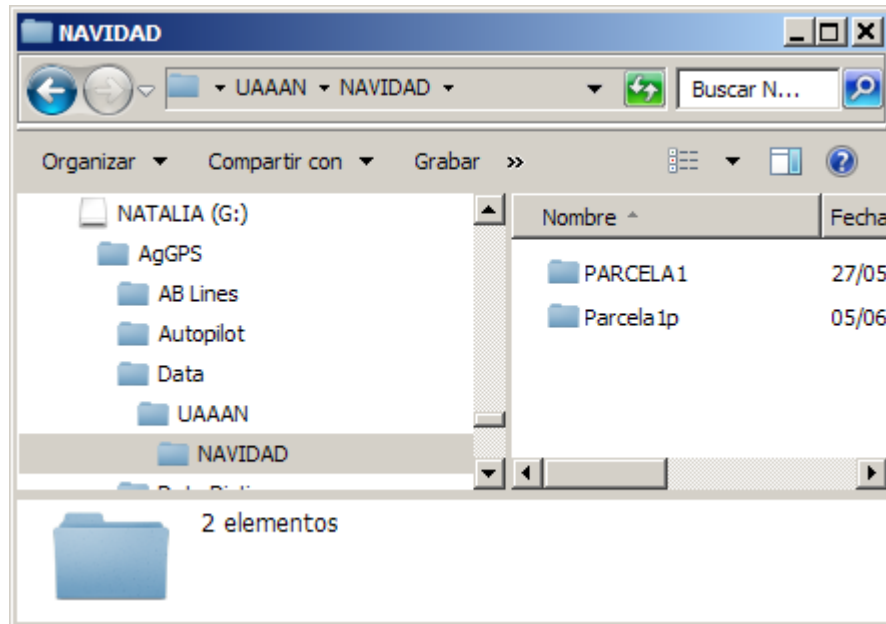
tribitutos de event

Implemento Seleccionado: **Arado Articulado**
3m ancho pasada
3m ancho de aplicación



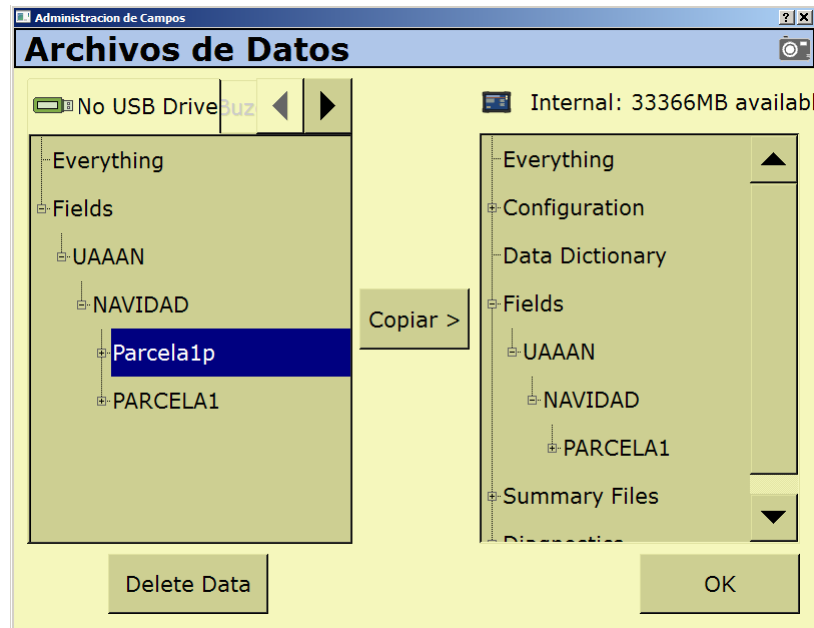
Cancelar Campo 55.12km SW OK

7. Pulsar OK
8. Pulsar 
9. Pulsar OK en la ventana *PlanoAuto*
10. Pulsar el botón Inicio 
11. Pulsar cerrar campo
12. Desde el explorador de archivos copiar el campo Parcela1p (procesado en el simulador) a la carpeta de campos de la memoria USB



F.3.3. Cargar mapa de prescripción a la pantalla FmX


1. Insertar la memoria en el puerto USB de la pantalla.
2. Copiar el campo de prescripción
 - Encender la pantalla
 - Pulsar **Archivos de Datos**
 - Seleccionar el campo con la prescripción (Parcela1p)




- Pulsar Copiar
- Pulsar OK

E.3.4. Diseño de trabajo en FieldLevel II

1. Abrir la pantalla de ejecución

- Pulsar el boton 
- En la pantalla selección de configuración pulsar OK
- Seleccionar el campo con los datos de prescripción; Pulsar OK

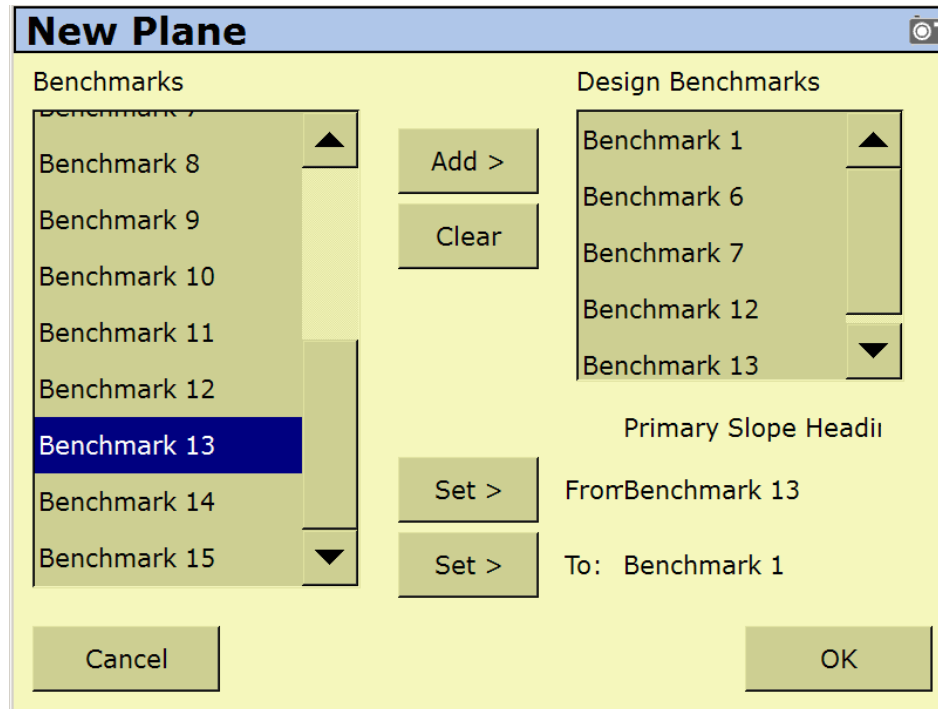
2. Seleccionar la pestaña de trabajo 

3. Presionar 

4. Presionar *Nuevo Plano*

5. Definir la dirección de la pendiente, del BM13 al BM1

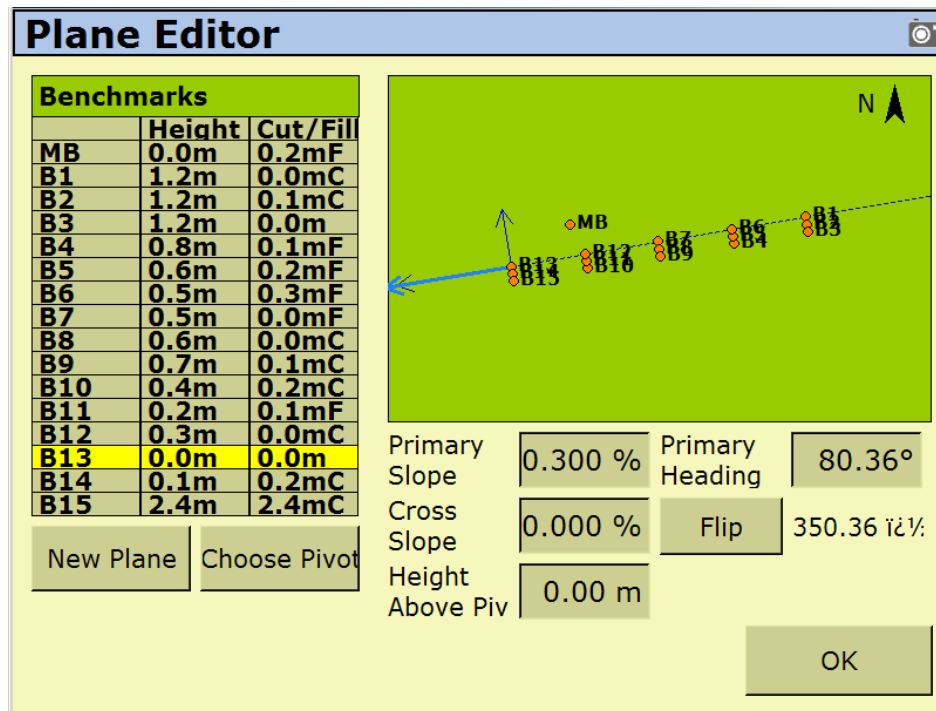
6. Agregar a la lista de Puntos de diseño los BM 1,6,7,12 y 13; pertenecientes a la primer columna y se encuentran en la dirección de la pendiente principal



7. Pulsar OK

8. En la ventana de Edición del Plano ingresar en las casillas los datos:


- Primary Slope 0.3 % (pendiente entre el BM13 y BM1)
- Cross Slope 0.0% (La pendiente transversal no es uniforme)
- Height Above Pivot 0.0 m



9. Pulsar OK

F.4 Laboreo Variable en base al mapa de prescripción

F.4.1. Ajustes preliminares

1. Nivelar la sección trasera y delantera.
2. Medir la altura de la antena tomando como referencia la punta del cincel delantero; restarle 0.20 m e ingresar el dato al controlador.
 - Pulsar Config 
 - Pulsar Configure
 - Seleccionar FieldLevel II y presionar Configurar
 - En la pestaña *Configuración Hoja* ingresar el dato en Altura de antena

Configuración FieldLevel II

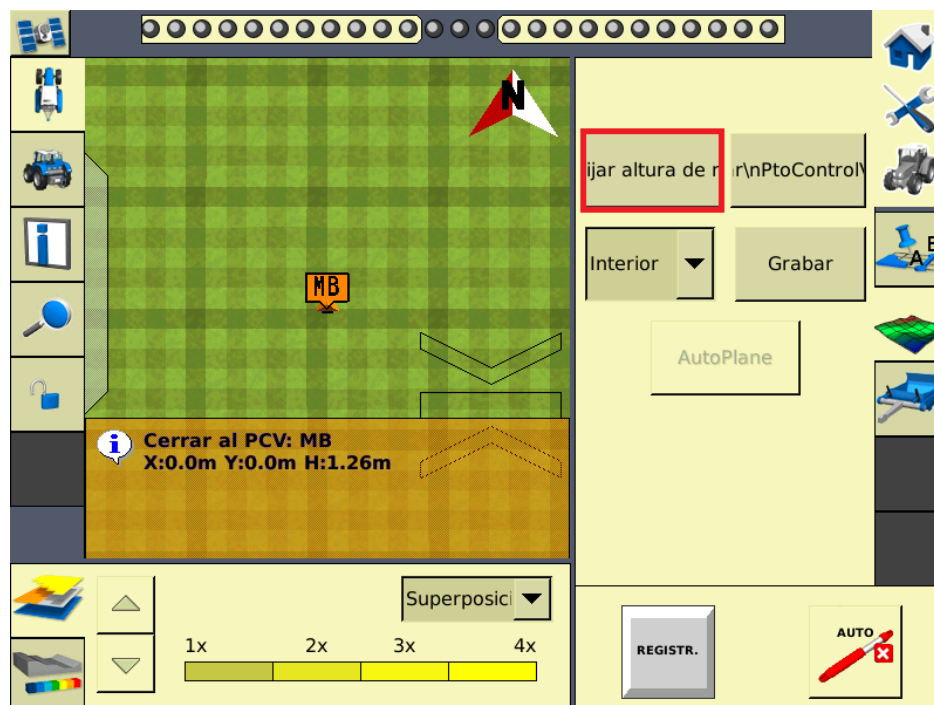
Configuraciones Configuración Hoja Alturas Relativas Programación de Válv


Paso Hoja	0.010 m
Incremento grosero de la hoja	0.100 m
Altura de Antena	1.970 m
Límite a nivel	0.05 m
Desactivar Subir	1.0 s
Auto Entrada Remota	Inhabilitado

Cancelar OK

F.4.2. Trabajo en campo

1. Posicionarse en el MBP y presionar Fijar altura de referencia

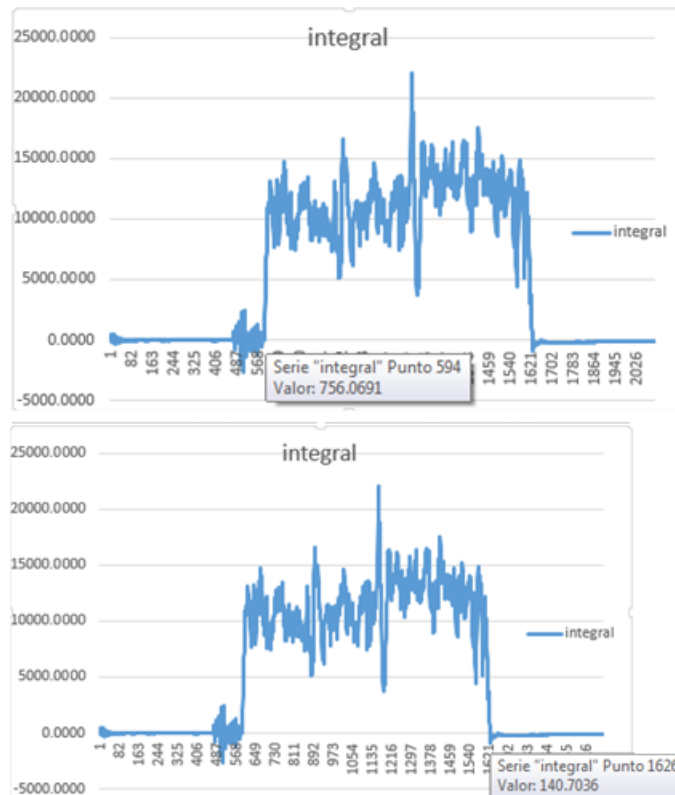


2. Esperar 30 segundos para que el sistema promedie la ubicación del MBP
3. Situarse en el lote a realizar el laboreo
4. Pulsar  e iniciar los recorridos.

Anexo G

Procedimiento para el cálculo de energía por el método del área bajo la curva MATLAB

Las gráficas ya están en Newton, y se observan los valores iniciales del análisis y finales como se observan en las figuras.

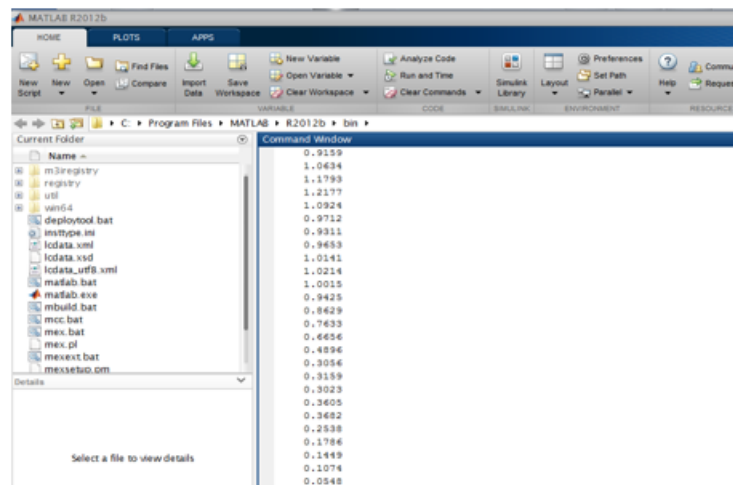
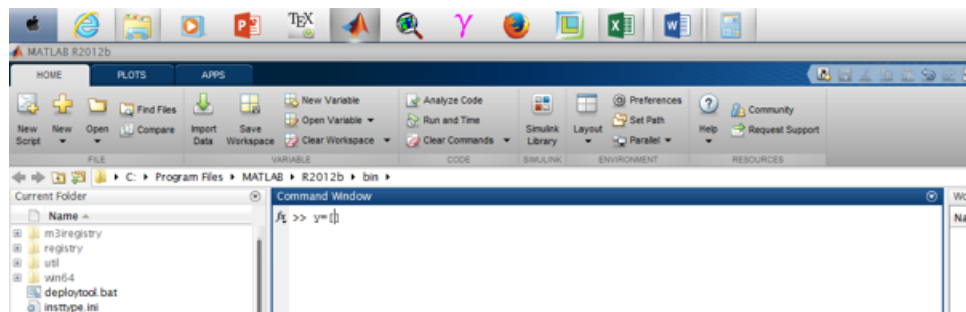


Identificamos los datos y tenemos Inicio: 591 Final: 1626 Diferencia: 1035 datos

para análisis en Matlab. Para la estos valores corresponden al valor de Y en Matlab

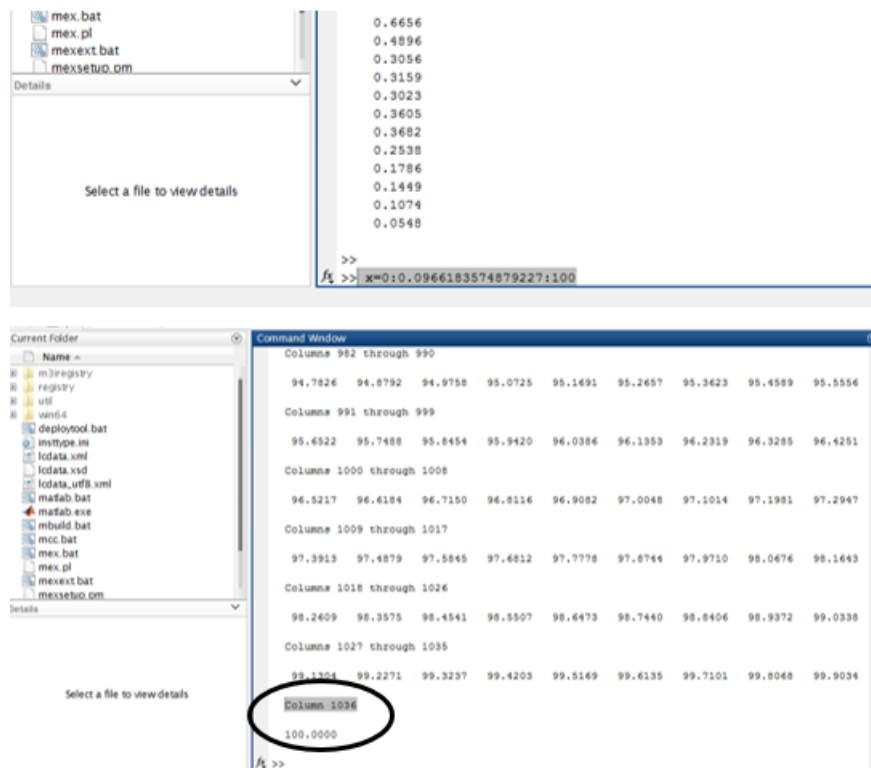
580	-1.8774	-0.2889	0.1302	0.4011	0.4946	1.3240	-0.0969	32.3748	37.6476	-411.5100	-715.7852	-263.6476	102.
587	-1.7672	-0.2573	0.1348	0.3506	0.4421	1.3265	0.0133	64.7496	112.7784	320.7400	91.5110	206.1255	242.
588	-1.7723	-0.2564	0.1322	0.3555	0.4353	1.3234	0.0082	84.0052	70.1988	249.9800	197.1716	223.5758	238.
589	-1.7836	-0.2554	0.1357	0.3524	0.4368	1.3222	-0.0031	106.6464	127.9032	294.2050	173.6402	233.9226	341
590	-1.8177	-0.2546	0.1356	0.3527	0.4603	1.3262	-0.0372	122.7280	125.4372	289.8550	-187.7898	51.0326	370.
591	-1.8301	-0.2552	0.1347	0.3396	0.4867	1.3225	-0.0496	109.8204	110.3124	480.0950	-593.8218	-56.8634	329.
592	-1.8016	-0.2534	0.1362	0.3266	0.4691	1.3225	-0.0211	148.5432	135.4656	668.1600	-323.9028	172.1286	433.
593	-1.8299	-0.2520	0.1338	0.3697	0.4540	1.3252	-0.0494	177.7440	95.3520	44.2250	-91.5110	-23.6430	41
594	-1.7675	-0.2506	0.1360	0.3515	0.4208	1.3198	0.0130	206.7332	132.8352	307.5450	420.0278	363.7864	546.
595	-1.7065	-0.2483	0.1354	0.3176	0.4017	1.3198	0.0740	255.1896	122.8068	798.6600	713.4782	756.0691	633.
596	-1.7294	-0.2476	0.1399	0.2989	0.4209	1.3225	0.0511	271.2712	195.6360	1070.8250	417.7208	744.2729	738.
597	-1.5673	-0.2451	0.1563	0.2006	0.3373	1.3256	0.2132	322.9016	466.5672	2495.7400	1703.7964	2099.7682	1112.
598	-1.4041	-0.2366	0.1614	0.1293	0.2442	1.3234	0.3764	503.8196	549.2604	3529.0100	3135.3668	3332.1884	1556.
599	-1.4340	-0.2343	0.1782	0.1675	0.2071	1.3240	0.3465	552.2760	825.2880	2975.8350	3705.6572	3340.7461	193.
600	-1.3192	-0.2143	0.2097	0.0704	0.1043	1.3210	0.4613	975.2644	1344.6276	4383.0600	5287.3364	4835.1982	3295.
601	-1.1386	-0.2313	0.2102	-0.0663	0.1127	1.3234	0.6419	616.8140	1352.0256	6365.5000	5158.2982	5761.8991	2585.
602	-1.0116	-0.2313	0.2148	-0.0982	0.0137	1.3210	0.7689	616.8140	1427.3208	6827.9340	6681.4257	6754.6799	2660.
603	-0.9603	-0.2320	0.2361	-0.1504	-0.0144	1.3164	0.8202	600.7324	1778.4792	7584.6600	7113.2500	7342.9550	2975.
604	-0.8744	-0.2230	0.2438	-0.1943	-0.0661	1.3188	0.9061	791.1724	1903.9164	8221.7900	7908.8266	8065.3083	3486.
605	-0.7797	-0.2116	0.2583	-0.2276	-0.1243	1.3228	1.0008	1033.2428	2142.2964	8704.2050	8802.8968	8753.5509	4208.

Abrimos... Matlab... Y colocamos los datos $Y = [\text{datos}]$... como se muestra en la figura...



Para los valores de X necesitamos los valores en metros. Como se tiene la referencia de 100 m. para cada repetición. Dividimos la distancia total entre el número de datos de

Y. $X=100/1035=0.0966183574879227$ Ahora para el valor de x en Matlab se utiliza el siguiente formato: $X=0:0.0966183574879227:100$ Capturamos los valores en Matlab.



Como obtenemos un total de 1036 y capturamos 1035 para x marcara error, por lo tanto colocamos un nuevo valor de x que este entre la última columna deseada (1035) y el 100. (Número entre 99.9034 y 100) $X=0:0.0966183574879227:99.91$ Capturamos nuevamente:

The screenshot shows the MATLAB R2012b interface. The Command Window displays the following data for variable 'x':

```

Column 1036
100.0000
fx >> x=0: 0.0966183574879227:99.91
  
```

The Command Window also shows a list of columns with values:

```

Column# 973 through 981
93.9130 94.0097 94.1063 94.2029 94.2995 94.3961 94.4928 94.5894 94.6860
Column# 982 through 990
94.7826 94.8792 94.9758 95.0725 95.1691 95.2657 95.3623 95.4589 95.5556
Column# 991 through 999
95.6522 95.7488 95.8454 95.9420 96.0386 96.1353 96.2319 96.3285 96.4251
Column# 1000 through 1008
96.5217 96.6184 96.7150 96.8116 96.9082 97.0048 97.1014 97.1981 97.2947
Column# 1009 through 1017
97.3913 97.4879 97.5845 97.6812 97.7778 97.8744 97.9710 98.0676 98.1643
Column# 1018 through 1026
98.2609 98.3575 98.4541 98.5507 98.6473 98.7440 98.8406 98.9372 99.0338
Column# 1027 through 1035
99.1304 99.2271 99.3237 99.4203 99.5169 99.6135 99.7101 99.8068 99.9034
  
```

The value 99.3237 in the last row is circled in red.

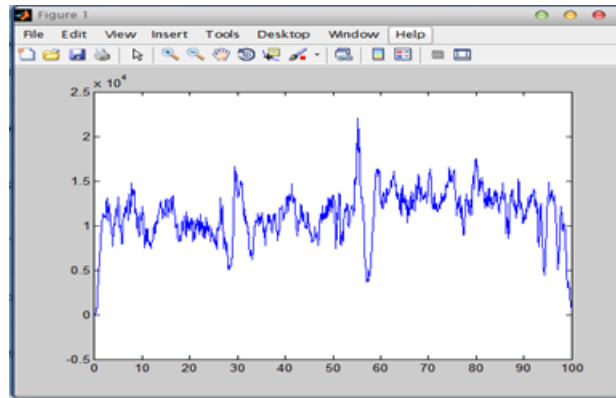
Ahora ya son coincidentes los valores de X y Y. Para obtener la gráfica se pone el comando `PLOT(X, Y)`, para obtención de área bajo la curva.

The screenshot shows the MATLAB R2012b Command Window with the following data and command:

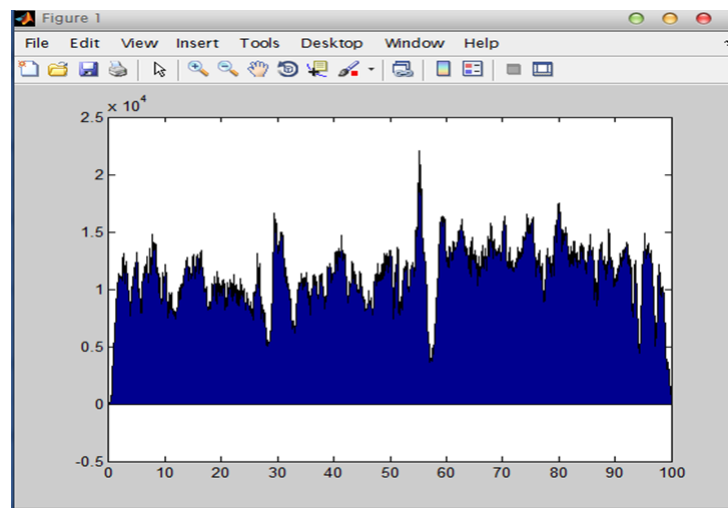
```

Column# 1027 through 1035
99.1304 99.2271 99.3237 99.4203 99.5169 99.6135 99.7101 99.8068 99.9034
fx >> plot(x,y)
fx >>
  
```

Y damos ENTER para obtener la gráfica de respuesta.



Ahora verificamos en área a obtener y se captura el comando AREA (X, Y).....ENTER.



Y por último se obtiene el área bajo la curva se coloca el comando TRAPZ(X, Y).

```

Select a file to view details
>> plot(x,y)
>> area(x,y)
>> trapz(x,y)
ans =
1.1244e+06

```