

**DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE SENSORES
PARA LA MEDICIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS
DEL SUELO APLICADOS EN LA GENERACIÓN DE
MAPAS DE DIAGNÓSTICO**

JUAN ANTONIO LÓPEZ LÓPEZ

T E S I S

Presentada como Requisito Parcial para
Obtener el Grado de:

**Maestro en Ciencias
INGENIERÍA DE SISTEMAS DE
PRODUCCIÓN**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO
Departamento de Postgrado

Saltillo, Coahuila, México
Junio 2014

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO

**DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE SENSORES PARA LA MEDICIÓN DE
PARÁMETROS FÍSICOS DEL SUELO APLICADOS EN LA GENERACIÓN DE
MAPAS DE DIAGNÓSTICO**

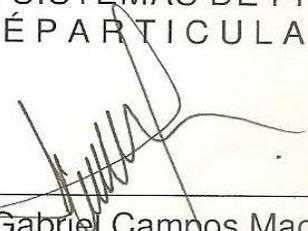
T E S I S

POR:

JUAN ANTONIO LÓPEZ LÓPEZ

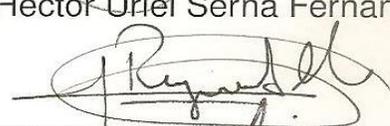
Elaborada bajo la supervisión del Comité Particular de Asesoría y aprobada
como requisito parcial, para optar al grado de:

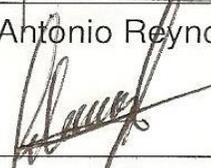
**MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN
COMITÉ PARTICULAR**

Asesor principal: 
DR. Santos Gabriel Campos Magaña

Asesor: 
DR. Martin Cadena Zapata

Asesor: 
M.C. Héctor Uriel Serna Fernández

Asesor externo: 
M.C. Marco Antonio Reynolds Chávez


DR. Fernando Ruiz Zarate
Subdirector de Postgrado

Saltillo, Coahuila, México.
Junio 2014

AGRADECIMIENTOS

A DIOS

Por darme la oportunidad de estar en esta vida y tener el deseo de superarme, más aún por la hermosa familia que me has dado.

A MI ALMA TERRA MATER

Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”

Por brindarme la oportunidad de formar parte nuevamente de esta honorable institución, lo que considero un privilegio y me siento orgulloso. Al programa ISP que me ha permitido cursar la Maestría para superarme profesionalmente.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

Por el apoyo brindado para poder realizar los estudios correspondientes al programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas de Producción.

A MI ASESOR

Dr. Santos Gabriel Campos Magaña

Por brindarme su confianza, gracias a su experiencia y conocimientos compartidos, he aprendido a manejar nuevas herramientas que han sido parte fundamental y me seguirán siendo útiles en el proceso de mi vida laboral.

A MIS ASESORES

DR. Martin Cadena Zapata M.C. Marco Antonio Reynolds Chávez M.C. Héctor Uriel Serna Fdez.

Por ser excelentes maestros y brindarme sus conocimientos, ya que gracias a sus consejos he tomado decisiones correctas en el trascurso de mi formación académica y de mi vida.

A MIS AMIGOS

M.C. Marco Antonio Reynolds Chávez Ing. Neftalí Cuervo Piña Ing. Juan Carlos Rodríguez

Que me han sabido comprender a pesar de todo y me han acompañado en mi formación, sin ellos esta etapa de mi vida no hubiera sido la misma, gracias por la gran amistad que me brindaron y por los momentos compartidos.

DEDICATORIA

A MIS PADRES

René López Calvo Águeda E. López López

Esta tesis se las dedico porque sé que les llena de orgullo haberme dado la vida, por apoyarme en lo que he decidido emprender, por sus consejos que me ha servido muchísimo para enfrentar todos los obstáculos, por aquellas palabras de ánimo, muchas gracias recuerdan que los quiero muchísimo.

A MIS HERMANITAS

Sandra Araceli López López Jovana del Carmen López López
Reyna Fabiola López López

Gracias por demostrarme su apoyo de manera incondicional en todos los aspectos. Mis mejores deseos a ustedes.

A MI NOVIA

Yesenia Elizabeth López Rodríguez.

Gracias por tu apoyo incondicional en todos los momentos difíciles de mi vida, por ser la compañera que siempre está conmigo y por hacerme muy feliz. Te deseo lo mejor. . . que Dios te bendiga siempre. . .

A MIS PADRINOS

Joaquín López Calvo Ma. Irene López Cano

Gracias a ustedes por sus consejos, por acompañarme a lo largo de este camino de mi vida profesional, que dios los bendiga siempre.

A MI ABUELITO

Caralampio López López

Gracias por sus consejos, y por todo su cariño, es usted un gran ejemplo a seguir, que dios los bendiga siempre.

COMPENDIO

Desarrollo y evaluación de sensores para la medición de parámetros físicos del suelo aplicados en la generación de mapas de diagnóstico

POR:

Juan Antonio López López

MAESTRIA

Ingeniería de Sistemas de Producción

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

Saltillo, Coahuila, México.

Junio 2014

Dr. Santos Gabriel Campos Magaña -Asesor-

Un carro porta-sensores fue desarrollado para medir en forma independiente y precisa algunos parámetros físicos del suelo, como: Resistencia a la Penetración (RP), Esfuerzo de Falla (EF), Resistencia al Corte (RC) y Permisividad Eléctrica (PE). Cada parámetro proporciona información para la generación de mapas de diagnóstico. Este trabajo de investigación fue desarrollado en “El Departamento de Maquinaria Agrícola de la UAAAN” y forma parte del proyecto: “Desarrollo de equipos, sensores e instrumentos para agricultura de precisión y labranza de conservación”. En la primera fase se obtuvo como resultado el prototipo del carro y el penetrómetro, el cual está integrado por dos sensores: para la medición de la fuerza y profundidad de RP. El primer sensor desarrollado fue un transductor de anillo simple con capacidad de medición de hasta 9 MPa, con una sensibilidad obtenida de $13,15mVN^{-1}$ y un coeficiente de correlación de 99.6 %

entre la fuerza aplicada y el voltaje de salida. Por otra parte, el sensor de medición de profundidad de RP, mostró un desplazamiento de trabajo máximo 0.60 m con una sensibilidad de $258,5mmV^{-1}$ y un coeficiente de correlación de 100 % entre la profundidad de penetración y la salida de voltaje. Los parámetros medidos fueron acondicionados y convertidos a señales digitales para su registro en tiempo real. En la evaluación del penetrómetro bajo condiciones de campo, se realizó un muestreo sistemático de 30 puntos geo-referenciados en una hectárea. Se generaron tres mapas de diagnóstico utilizando el método de interpolación IDW para tres rangos de profundidades diferentes: 0.10-0.20, 0.20-0.30 y 0.30-0.40m, obteniendo rangos de RP de (0.644-1.656), (1.30-2.35) y (1.71-3.96) MPa, respectivamente. Los valores obtenidos en los tres rangos de profundidad presentan variabilidad media en valores de RP de acuerdo a la clasificación de (Warrick y Nielsen, 1980). En la segunda fase se desarrolló el sensor de PE basado en un puente de Wheatstone configurado como: puente capacitivo o resistivo, para mediciones de humedad o conductividad eléctrica del suelo. Los resultados obtenidos de la calibración en laboratorio para el parámetro humedad muestran que el sensor tiene una ecuación de respuesta de $Humedad = 10,58 + 0,04105mV - 0,000012mV^2$ y un coeficiente de correlación de 97.5 % entre la humedad conocida y el voltaje de salida. Con la finalidad de hacer más eficiente la respuesta del sensor de humedad, se hizo una transformación logarítmica, obteniendo una sensibilidad de $Humedad = -34,65 + 10,57ln(mV)$ y un coeficiente de correlación del 98 % en forma lineal. En una tercera fase se desarrolló y calibró un transductor octagonal de anillo extendido (OAE) para medición de RC del suelo. Los resultados de calibración del octagonal bajo condiciones de laboratorio mostraron un coeficiente de correlación superior al 99 % entre la fuerza aplicada y el voltaje de salida, fue evaluado a tres profundidades y permite estimar la energía aplicada en el laboreo de suelo.

Palabras clave: Carro-portasensores, sensores para suelos, resistencia a la penetración, mapas de diagnóstico.

ABSTRACT

Development and evaluation of sensors for the measurement of soil physical parameters applied in the generation of diagnosis maps.

By:

Juan Antonio López López

MASTER

Production System Engineering

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

Saltillo, Coahuila, México.

June 2014

PhD. Santos Gabriel Campos Magaña -Advisor-

Portable sensors carriage was developed to measure independently and accurately some soil physical parameters, such as Penetration Resistance (PR), Failure Stress (FS), Shear Strength (SS) and Permissiveness Electric (PE). Each parameter provides information for the generation of diagnostic maps. This research was developed in Agricultural Machinery Department at UAAAN and belongs to the project Development of equipment, sensors and instruments for precision agriculture and conservation tillage. In the first phase was obtained a portable sensors carriage prototype and the penetrometer, which consists of two sensors: for measuring the strength and depth of PR. The first sensor was developed in a simple ring transducer capable of measuring up to 9 MPa, with a sensitivity obtained of $13,15mVN^{-1}$ and a correlation coefficient of 99.6 % between the applied force and the output voltage. Moreover, the depth measuring sensor PR showed a maximum

working offset 0.60 m with a sensitivity of $258,5mmV^{-1}$ and correlation coefficient of 100 % between the penetration depth and the voltage output. The parameters measured were conditioned and converted to digital signals for real-time recording. In the assessment of the penetrometer under field conditions, a systematic sample of 30 points georeferenced in a hectare was performed. Three diagnostics maps using the IDW interpolation method for three ranges of different depths were generated : (0.10-0.20) , (0.20-0.30) and (0.30 - 0.40) meters , obtaining PR ranges of (0644-1656) , (1.30-2.35) and (1.71-3.96) MPa , respectively . The values obtained in three depth zones have average values of PR variability according to the classification by (Warrick and Nielsen, 1980). In the second phase PE sensor based on a Wheatstone bridge configured as capacitive or resistive bridge, for measurement of moisture or soil electrical conductivity. The results of laboratory calibration parameter for moisture contents show that the sensor has a sensitivity of $Moisture = 10,58 + 0,04105mV - 0,000012mV^2$ and a correlation coefficient of 97.5 % among the known moisture and the output voltage. In order to make the response of the moisture sensor more efficient, a logarithmic transformation was made, resulting in sensitivity of $Moisture = -34,65 + 10,57ln(mV)$ and a correlation coefficient of 98 % linearly. In a third phase was developed and calibrated an extended octagonal ring transducer (EORs) for measuring (SS) of soil. The results of octagonal calibration under laboratory conditions showed higher correlation coefficient of 99 % between the applied force and the output voltage, was evaluated at three working depths that allows to estimate the applied energy for the tillage of the soil.

Keywords: Portable sensors carriage, sensors for soil penetration resistance, soil maps diagnostic.

Índice general

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general	3
1.1.1. Objetivo específicos	3
1.2. Hipótesis	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1. Labranza	5
2.1.1. Labranza Primaria	6
2.1.2. Labranza secundaria	6
2.2. Agricultura de precisión	7
2.3. GPS Y SIG en agricultura de precisión	9
2.3.1. Sistema de pocisionamiento global (GPS)	9
2.3.2. Sistemas de información geográfica (SIG)	11
2.4. Variabilidad del suelo	13
2.4.1. clasificacion de la variabilidad	14
2.4.2. Uso de herramientas estadísticas en el estudio de la varia- bilidad	15
2.4.3. Mapa de Variabilidad	16
2.5. Propiedades físicos-mecánicos del suelo	16

2.5.1.	Compactación de suelo y Resistencia a la penetración . . .	17
2.5.2.	Resistencia a la falla	19
2.5.3.	Densidad aparente	19
2.5.4.	Conductividad eléctrica	20
2.5.5.	Resistividad eléctrica	25
2.5.6.	Humedad del suelo	27
2.6.	Desarrollo de sensores aplicados en la agricultura	33
2.6.1.	Sensores eléctricos y electromagnéticos	33
2.6.2.	Sensores de Tratamientos en tiempo real	35
2.6.3.	Sensores mecánicos	36
2.7.	Diseño de transductores	39
2.7.1.	Análisis teórico del diseño del transductor anillo	39
2.7.2.	Sensor de anillo Extendido (EOR)	42
2.7.3.	Galgas extensiométricas	44
2.7.4.	Puente de Wheatstone	45
2.7.5.	Sistema de adquisición de datos	46
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	51
3.1.	Acondicionamiento del carro porta sensores	51
3.2.	Desarrollo del Penetrómetro	52
3.2.1.	Desarrollo del transductor para medición de fuerza de RP .	52
3.2.2.	Desarrollo del sensor de medición de profundidad	57
3.3.	Desarrollo del sensor para la medición de la permisividad eléctrica del suelo	63

3.3.1.	Diseño y evaluación de sensibilidad	63
3.3.2.	Acondicionamiento de la señal	66
3.3.3.	Determinación de la humedad del suelo	66
3.3.4.	Calibración del sensor de PE	67
3.4.	Sensor para medición de fuerza a la roturación del suelo	68
3.4.1.	Diseño del sensor de RC	68
3.4.2.	Montaje de galgas extensiométricas	68
3.4.3.	Adquisición de datos	69
3.4.4.	Calibración	70
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	72
4.1.	Resultados del acondicionamiento del carro porta sensores	72
4.2.	Desarrollo del penetrómetro	73
4.2.1.	Resultados del transductor de medición de fuerza de resistencia a la penetración (RP)	74
4.2.2.	Resultados del sensor de profundidad	78
4.2.3.	Resultados de la evaluación en campo	84
4.2.4.	Resultados de los mapas de diagnóstico de RP	88
4.3.	Resultados del desarrollo del sensor para la medición de permisividad eléctrica (PE) del suelo.	92
4.3.1.	Resultados del diseño y evaluación de sensibilidad	92
4.3.2.	Resultados del acondicionamiento y simulación de la señal	94
4.3.3.	Resultados de calibración del sensor de permisividad eléctrica	96
4.3.4.	Comparación de resultados de determinación de humedad con método gravimétrico y sensor de (PE).	100

4.4. Resultados del sensor para medición de fuerza de resistencia al corte (RC) del suelo	102
4.4.1. Resultado de Diseño	102
4.4.2. Resultado del montaje de galgas extensiométricas	103
4.4.3. Resultados de calibración	104
4.4.4. Resultados de prueba en campo	111
4.4.5. Resultados de la obtención de energía de roturación	113
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	116
5.1. Conclusiones	116
5.2. Recomendaciones	117
6. LITERATURA CITADA	118
7. ANEXOS	126

Índice de figuras

2.1. (a) Satélite NAVSTAR. (b) Constelación de los satélites del sistema GPS.	9
2.2. Corrección diferencial realizada con la ayuda de un satélite geoes-tacionario.	11
2.3. Corrección diferencial RTK	11
2.4. Capas de un SIG.	12
2.5. Principio físico de la conductividad eléctrica.	21
2.6. Prueba del desarrollo del circuito de un Conductivímetro.	23
2.7. Diagrama de bloques del conductivímetro desarrollado por calde-ron (2005).	25
2.8. Diagrama electrónico de conductivímetro propuesto por Calderón (2005).	25
2.9. Método de Wenner para medir la conductividad eléctrica del suelo.	26
2.10. Comportamiento eléctrico de electrodos inmersos en un material .	31
2.11. Puentes: a) resistivo y b) impedancia (Magan, 2002)	31
2.12. Disposición de los electrodos en equipos (a) ERDC3100 VERIS correspondiente a una configuración Wenner y (b) ARP GEOCARTA.	34
2.13. Ejemplo de un mapa de conductividad eléctrica aparente (ECa) ob-tenido con un equipo EM38.	35
2.14. Sistema de tratamiento en tiempo real con sensor de vegetación situado delante del tractor.	36

2.15. Sistema de tratamiento en tiempo real con sensor de vegetaciónEs- quema ilustrativo de cuchilla plana desarrollada por Adamchuk (2001b).	38
2.16. Modelo CAD del sensor de perfil de la compactación del suelo (SCP).	39
2.17. Fuerzas actuando en un elemento del anillo.	40
2.18. Transductores de tipo anillo: (a) anillo liso extendido; (B) anillo oc- tagonal extendido (EOR).	42
2.19. Galgas extensiométricas.	44
2.20. Puente de Wheatstone (Godwin, 1993)	46
2.21. Diagrama de bloques del sistema de instrumentación completo del tractor (Kheiralla y Azmi, 2002).	49
2.22. Dispositivo de adquisición de datos DAQBOOK/2000.	49
3.1. Diseño en Pro-E del mecanismo de control de profundidad del carro-portasensores.	51
3.2. Puntas normalizadas por ASAE (2002a).	53
3.3. Configuración de las galgas en el puente de Wheatstone.	54
3.4. Diagrama de calibración del sensor de resistencia a la penetración.	55
3.5. a) Sensor y b) conexiones del sensor LV-MaxSonar-EZ1.	58
3.6. Amplificador AD620AN.	58
3.7. Diagrama de conexión del amplificador.	59
3.8. Diagrama de conexión del amplificador configurado como filtro. . .	60
3.9. Diagrama de conexión de los amplificadores AD620 en serie con configuración de filtro y filtro paso bajo.	60
3.10. Diagrama de calibración del sensor para la medición de profundidad.	61
3.11. Área de muestreo de 30 puntos.	62
3.12. Puente de Impedancia (Magan 2002).	64

3.13. Puente de Wheatstone.	64
3.14. Combinaciones posibles de un puente de Wheatstone para encontrar la mejor sensibilidad en el circuito.	65
3.15. Diseño de probeta (Creo Parametric 2.0) para evaluación en laboratorio.	65
3.16. Configuración del puente capacitivo para medición de humedad del suelo.	66
3.17. Factores de diseño del sensor octagonal extendido.	68
3.18. Localización de galgas en el octagonal y puentes de Wheatstone para la fuerza en la dirección FX y MOMENTO.	69
3.19. Marco de calibración del transductor octagonal	71
4.1. Sensores de diagnóstico acoplados al carro porta-sensores.	73
4.2. Penetrómetro integrado por sensor de fuerza, sensor de profundidad y cono.	73
4.3. Ubicación del penetrómetro en el carro-portasensores.	74
4.4. Parámetros importantes de diseño en el transductor de anillo y (b) dimensiones finales del transductor diseñado (mm).	75
4.5. Configuración de las galgas extensiométricas para la medición de la fuerza aplicada en el transductor de anillo.	75
4.6. Especificaciones de galgas extensiométricas de 350 Ohms (Ω).	76
4.7. Materiales utilizados en la calibración del sensor de fuerza	76
4.8. Gráfica de calibración del sensor de fuerza	77
4.9. Ecuación de respuesta del sensor de fuerza de RP.	78
4.10. (a) Circuito impreso (b) en 3D y (c) real del sensor de profundidad.	79
4.11. Materiales utilizados en la calibración del sensor de profundidad	80
4.12. Gráfica de calibración del sensor de fuerza	80

4.13. Ecuación de respuesta del sensor de profundidad.	81
4.14. Gráfica de comportamiento del porcentaje de ruido vs distancia. .	83
4.15. Gráfica de linealidad de la salida de la señal con filtrado.	83
4.16. Carro porta-sensores acoplado al tractor y partes del sistema de muestreo de resistencia a la penetración.	84
4.17. Resultados de las gráficas obtenidas en campo para a) RP y b) profundidad.	85
4.18. Resultados de la resistencia del suelo medida con el penetrómetro (índice de cono) en un punto de medición.	86
4.19. Resultados de las gráficas obtenidas en campo para a) RP y b) profundidad.	88
4.20. Mapa 2D de Resistencia a la penetración para 0.20 m. de profun- didad.	88
4.21. Mapa 3D de Resistencia a la penetración para 0.20 m. de profun- didad.	89
4.22. Mapa 2D de Resistencia a la penetración para 0.30 m. de profun- didad.	89
4.23. Mapa 3D de Resistencia a la penetración para 0.30 m. de profun- didad.	90
4.24. Mapa 2D de Resistencia a la penetración para 0.40 m. de profun- didad.	90
4.25. Mapa 3D de Resistencia a la penetración para 0.40 m. de profun- didad.	91
4.26. Ubicación de los discos (sonda) para medir PE	92
4.27. Combinación elegida para realización del sensor de permisividad.	93
4.28. Diseño del circuito de linealización de señal para simulación. . . .	94
4.29. Resultado de la simulación de circuito de linealización.	94

4.30. Desarrollo del circuito del sensor de PE a) esquemático, b) 3D y c) real.	95
4.31. Materiales utilizados en la calibración del sensor de permisividad eléctrica	96
4.32. Gráfica de calibración del sensor de P.E.	97
4.33. Ecuación cuadrática de calibración del sensor de P.E.	98
4.34. Gráfica obtenida para la generación de ecuación lineal de calibración del sensor.	99
4.35. Comportamiento de la humedad gravimétrica y sensor PE durante la calibración.	100
4.36. Comparación entre los valores de humedad gravimétricos y a) sensor PE cuadrático b) sensor PE lineal.	101
4.37. Sensor desarrollado OAE.	102
4.38. (a) Diseño CREO 2.0 y (b) dimensiones finales del transductor en (mm).	102
4.39. Montaje de galgas y sus puentes de Wheatstone.	103
4.40. Especificaciones de galgas extensiométricas de 120Ω empleadas en el octagonal de anillo extendido.	103
4.41. Materiales utilizados en la calibración del sensor OAE.	104
4.42. (a) Gráfica de calibración del sensor para la FX en 3 posiciones a) 0.54, b) 0.64 y c) 0.74 m.	106
4.43. Ecuación de calibración para FX del sensor.	106
4.44. (Gráfica de respuesta de calibración del sensor para MOMENTO en 3 posiciones a) 0.54, b) 0.64 y c) 0.74 m.	107
4.45. Ecuación de calibración del momento para 3 posiciones: a) 0.54, b) 0.64 y c) 0.74 m.	109
4.46. Ubicación del sensor acoplado en el carro-portasensores.	112

4.47. Resultados de campo para el sensor de energía a diferentes profundidades	112
4.48. Resultados de campo para el sensor de energía a diferentes profundidades	114
4.49. Resultados de campo para el sensor de energía a diferentes profundidades	114
4.50. Resultados de campo para el sensor de energía a diferentes profundidades	115

Índice de cuadros

2.1. Etapas para la aplicación de agricultura de precisión.	8
2.2. Frecuencia obtenida con diferentes conductivímetros evaluados por calderón (2005).	24
2.3. Sensores disponibles para el análisis dinámico de suelos y atributos evaluados con cada uno de ellos. (Adamchuk <i>et al.</i> , 2004). . .	33
3.1. Ajuste de parámetros en el amplificador DBK-43a para la calibración del sensor.	55
3.2. Pesos aplicados en la calibración del sensor de fuerza.	56
3.3. Secuencia de ascenso y descenso de los pesos para la calibración.	56
3.4. Ajuste de parámetros en el amplificador DBK-43a para la calibración del sensor RC	70
3.5. Tabla de pesos conocidos en la calibración del sensor RC	71
4.1. Resultados de la deformación en mV al momento de realizar la calibración del sensor ring aplicando diferentes pesos.	77
4.2. Análisis de varianza para el sensor de fuerza.	78
4.3. Resultados promedio del voltaje del sensor de profundidad aplicando diferentes distancias.	81
4.4. Resultado de porcentaje de ruido para la salida de la señal en el sensor de profundidad.	82
4.5. Resultados de campo para la resistencia a la penetración y su profundidad.	87
4.6. Resultados del CV para la clasificación de la variabilidad	92

4.7. Resultados de la prueba de la sensibilidad para AC y DC.	93
4.8. Tabla de humedades conocidas para aplicar en la calibración de sensor.	96
4.9. Resultados del voltaje del sensor de profundidad aplicando distintas humedades conocidas.	97
4.10. Valores obtenidos durante la transformación	99
4.11. Valores obtenidos para la medición de humedad del suelo con los sensores.	100
4.12. Resultados de las repeticiones de las pruebas de calibración de fuerzas del OAE para la FX aplicando los pesos en 0.54m.	105
4.13. Resultados de las repeticiones de las pruebas de calibración de fuerzas del OAE para la FX aplicando los pesos en 0.64m.	105
4.14. Resultados de las repeticiones de las pruebas de calibración de fuerzas del OAE para la FX aplicando los pesos en 0.74m.	105
4.15. Resultados de las repeticiones de las pruebas de calibración del OAE para el momento a 0.54m.	108
4.16. Resultados de las repeticiones de las pruebas de calibración del OAE para el momento a 0.64m.	108
4.17. Resultados de las repeticiones de las pruebas de calibración del OAE para el momento a 0.74m.	108
4.18. Resumen de resultados obtenidos para 3 posiciones de las pruebas de calibración de fuerzas del OAE el momento.	110
4.19. Datos de las ecuaciones de calibración para momento	110
4.20. Análisis de varianza para momento.	111
4.21. Comparación de medias Tukey ($P > 0.05$) para momento.	111
4.22. Demanda de energía para 100m lineales y por hectarea	115

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se incrementó 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. 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, 2003).

En la explotación de cultivos extensivos la preparación de suelos, es la actividad agrícola que representa los mayores costos unitarios de producción y la que consume la mayor cantidad de combustible fósil. En la actualidad debido al costo creciente de los combustibles, la reducción de los precios de los productos agrícolas y aspectos medio ambientales, han ido llevando a una progresiva reducción de las labores y a la búsqueda de alternativas tecnológicas que sustituyan el manejo tradicional de producción. Según diferentes estudios realizados, con el manejo apropiado de una labor agrícola puede conseguirse una disminución en el consumo de combustible de hasta un 30 % (IDAE, 2006).

A nivel nacional existe una alta demanda en la producción de alimentos de los cuales aproximadamente diez millones de hectáreas pertenecen a cultivos básico (maíz, trigo, frijol), mismos granos en el que nuestro país presenta una producción deficitaria (FAO, 2009). Normalmente el problema que existe en la preparación de suelo es que se realiza un tratamiento homogéneo (labranza tra-

dicional) lo cual repercute en la cosecha de cultivos, dado que no son del todo aprovechables causando poca rentabilidad en producción.

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, en realidad, es la posibilidad de identificar, cuantificar y mapear esa variabilidad. Más aún, es posible georreferenciar y aplicar los insumos con dosis variables en puntos o áreas de coordenadas geográficas conocidas.

La nueva 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 posición global (GPS), sensores, y sistema de información geográfica (SIG) para estimar y evaluar dichas variaciones (Bongiovanni *et al.*, 2006).

La Agricultura de Precisión ha sido ampliamente difundida y aceptada, incrementando el interés en el uso de sensores para la extracción de información de las variables del suelo y las plantaciones. Muchos de estos sensores están acoplados a un sistema de posicionamiento global (GPS), para obtener los mapas de las diferentes variables medidas. Los datos de salida vienen siendo una gran fuente de información que refleja la variabilidad espacial de los factores determinados (Andrade *et al.*, 2004).

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. La adopción de equipos de agricultura de precisión es un tema de gran importancia en México, ya que no se cuenta con equipos para conocer los requerimientos a nivel espacial de propiedades físicas para optimizar la labranza, el uso de insumos y mejorar los rendimientos de las producciones agrícolas. Por lo que se requiere contar con un sistema integrado por sensores para el diagnóstico de suelos, com-

binados con equipo de adquisición, registro y almacenamiento de información en tiempo real, GPS y SIG, para la elaboración de mapas de diagnóstico del estado físico-mecánico de suelos agrícolas.

Actualmente en la “Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro” no se cuenta con maquinaria ni equipos e instrumentos automatizados para docencia e investigación en mecanización para la agricultura de precisión.

Con relación a esta problemática, el propósito del presente proyecto es el desarrollo de sensores para medición de: Resistencia a la Penetración (RP), Permisividad Eléctrica (PE) y Resistencia al Corte (RC). Acoplados a un carro porta-sensores para medir en forma independiente y precisa dichos parámetros físicos del suelo, integrando equipo de adquisición para el registro, almacenamiento de información en tiempo real y sistema de georreferenciación AgGPS con corrección RTK. Para la generación de mapas de diagnóstico del estado físico-mecánico de suelos agrícolas.

1.1 Objetivo general

Cuantificar parámetros físicos del suelo en tiempo real utilizando sensores y sistemas de posicionamiento global para la generación de mapas de diagnóstico.

1.1.1. Objetivo específicos

1. Desarrollar sensores para la medición de resistencia a la penetración (RP), permisividad eléctrica (PE) y resistencia al corte de suelo (RC).
2. Evaluar los sensores de RP, PE y RC en laboratorio para obtener su ecuación de respuesta.

3. Evaluar sensores en campo para determinar la magnitud de parámetros físicos del suelo.
4. Elaboración de mapas de diagnóstico de parámetros físicos del suelo.

1.2 Hipótesis

Mediante el empleo de sensores y sistemas de posicionamiento global se cuantificará la magnitud y posición de parámetros físicos del suelo, lo que permitirá generar mapas de diagnóstico.

Capítulo 2

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Labranza

La labranza es una actividad que modifica la estructura de la capa superficial del suelo. 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, 1994).

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, 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, 1997).

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, 1997)

2.2 Agricultura de precisión

En las últimas dos décadas, gracias a la disponibilidad de las nuevas tecnologías geo-espaciales, se ha comenzado a administrar las explotaciones agrarias 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).

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).

La aplicación de la AP busca reorganizar completamente el sistema agrario, dirigiéndolo hacia una agricultura de bajos insumos, alta eficiencia y sostenibilidad (Shibusawa, 1998). Este cambio es posible gracias a la aparición de nuevas tecnologías, las cuales cuando se aplican conjuntamente, de forma coordinada,

logran unos beneficios indudables. Estas técnicas incluyen el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), los Sistemas de Información Geográficos (SIG), la miniaturización de los componentes electrónicos de los ordenadores, el control automático y control remoto de maquinaria.

En el Cuadro (2.1), se presentan las principales etapas o pasos para la aplicación de AP las tecnologías involucradas y las actividades realizadas.

Cuadro 2.1: Etapas para la aplicación de agricultura de precisión.

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

2.3 GPS Y SIG en agricultura de precisión

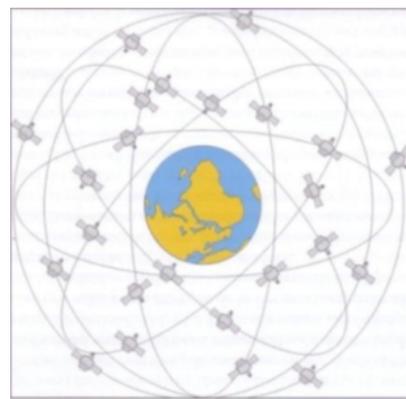
2.3.1. Sistema de posicionamiento global (GPS)

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 geoestacionario de navegación (EG-NOS).

En el 78 se lanzó el primer satélite (Figura 2.1a) 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 2.1b), 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.



(a)



(b)

Figura 2.1: (a) Satélite NAVSTAR. (b) Constelación de los satélites del sistema GPS.

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 2.5). 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

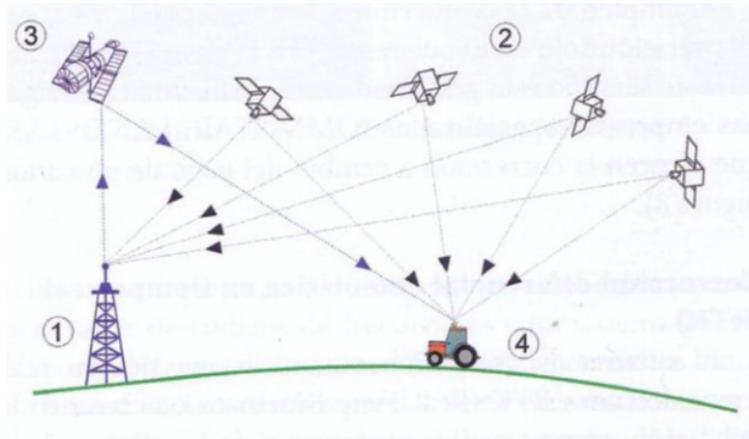


Figura 2.2: Corrección diferencial realizada con la ayuda de un satélite geostacionario.

con el DGPS existe una estación base (Figura 2.3), pero que, en este caso, envía la información de la corrección vía radio al receptor (situado a unos 3-5 km de las estación base). Usando este método, se consiguen precisiones del orden de pocos centímetros.

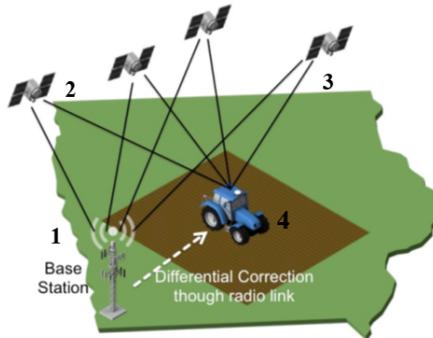


Figura 2.3: Corrección diferencial RTK

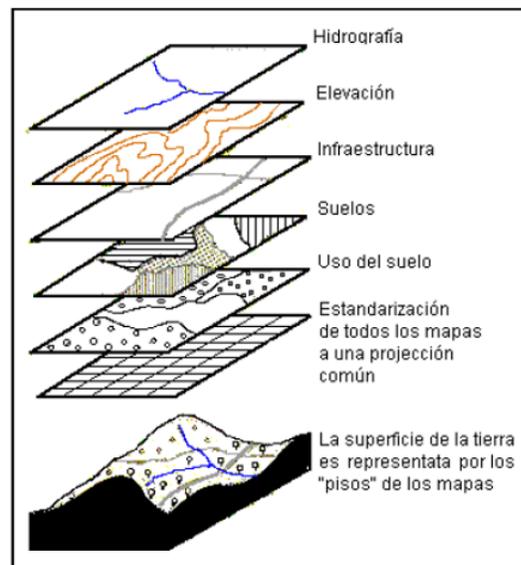
2.3.2. Sistemas de información geográfica (SIG)

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

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).

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).



(Fuente: F.A.O., 1999)

Figura 2.4: Capas de un SIG.

En general la información espacial se representa en forma de “capas” (Figura 2.4), 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).

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 surafricano 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.

2.4 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).

2.4.1. clasificación de la variabilidad

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. La asociación espacial entre estos atributos y rendimiento de 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 (Khosla *et al.*, 2002).

Comprender la variabilidad es una de las claves de la agricultura de precisión. Se han identificado tres formas principales de variabilidad a tener en cuenta: espacial, temporal y en la estimación.

1. La variabilidad espacial, es la que se da a lo largo y ancho del terreno. Esta variabilidad se puede reflejar mediante mapas de suelo. Si esta variabilidad es significativa, es el agricultor el que debe tomar las decisiones, aunque lo normal es contrastar este mapa con los de rendimiento.
2. La variabilidad temporal se pone de manifiesto al comparar mapas de rendimientos de un año a otro, y su significado también debe ser deducido,

aunque se pueden obtener mapas de tendencias que muestren las características fundamentales.

3. La variabilidad en la estimación, es la diferencia de lo estimado, con respecto a lo obtenido. Para un correcto aporte de inputs, se deben hacer ciertas aseveraciones, para obtener el rendimiento estimado. Si ese rendimiento no se obtiene, las aseveraciones que se hicieron en un primer momento, deberán ser mejoradas.

2.4.2. Uso de herramientas estadísticas en el estudio de 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).

Para estudiar esta dependencia, es necesario un número considerable de mediciones, referenciadas geográficamente, en diferentes puntos y profundidades del lote, con el fin de caracterizar adecuadamente el suelo mediante la utilización de herramientas geoestadísticas y multivariadas, las cuales permiten estimar y deducir la distribución espacial de las propiedades del suelo (Cruz *et al.*, 2010)

En geoestadística se utilizan dos modelos teóricos de semivarianza, acotados (modelo esférico, exponencial y gaussiano) y no acotados (lineal, logarítmico y potencial). Estos modelos de semivarianza son producto de la representación de valores de cada región de muestreo frente a una distancia media, ajustados

a modelos teóricos para ayudar a describir su comportamiento en distancias mayores y puntos no conocidos. Una vez ajustados los datos a modelos de distribución espacial, se procede a realizar mapas de interpolación para los cuales se selecciona la interpolación de Kriging, la cual encierra un conjunto de métodos de predicción espacial y se fundamentan en la minimización del error cuadrático medio de predicción (Carvalho, 2004).

2.4.3. Mapa de Variabilidad

Los mapas de rendimientos 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.

2.5 Propiedades físicos-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).

2.5.1. Compactación de 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 sen-

cilla 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.

De León *et al.*, (1998), señalan que el penetrómetro es una de las herramientas más utilizadas en estudios de la calidad física del suelo. El diseño de penetrómetros 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.

2.5.2. Resistencia a la falla

La determinación de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo, es uno de los puntos fundamentales de la Mecánica de suelos, ya que es imprescindible para la estabilidad de los suelos en las obras civiles.

El francés C.A. Coulomb admitió que los suelos fallan por esfuerzo cortante a lo largo de planos de deslizamiento, luego entonces la presión ejercida y el área del plano de falla dan origen a la ley de resistencia, en la cual, el suelo falla cuando el esfuerzo actuante alcanza un valor de corte, tal que: Esta proporción, está en función de un ángulo, al cual Coulomb llamo “Ángulo de fricción interna” y lo definió como una constante del material. En (1776) Coulomb físico e ingeniero francés, propone un mecanismo para estudiar la resistencia del suelo, que consiste en aceptar que dicho material falla por esfuerzo cortante a lo largo de un plano de deslizamiento. Observó que en dicho plano la resistencia al esfuerzo cortante, de cierto tipo de suelos, resultaba proporcional al esfuerzo normal actuante. Observó también que otros suelos como las arcillas saturadas, parecían tener una resistencia constante al esfuerzo cortante, independiente del esfuerzo normal aplicado. Otros suelos tenían un comportamiento intermedio, con una ley de resistencia al esfuerzo cortante.

2.5.3. Densidad aparente

La densidad aparente afecta al crecimiento de las plantas debido al afecto que tienen la resistencia y la porosidad del suelo sobre las raíces. Con un incremento de la densidad aparente, la resistencia mecánica tiende a aumentar y la porosidad del suelo tiende a disminuir, con estos cambios limitan el crecimiento

de las raíces a valores críticos. Los valores críticos de la densidad aparente para el crecimiento de las raíces, varían según la textura que presenta el suelo y de la especie de que se trate.

La densidad aparente (ρ_b) puede ser incluida dentro del grupo mínimo de parámetros a medir para evaluar la calidad de un suelo, como indicador de la estructura, la resistencia mecánica y la cohesión del mismo (Doran *et al.*, 1994).

2.5.4. Conductividad eléctrica

La inducción electromagnética (IE) que mide de manera no invasiva la conductividad eléctrica aparente (CEa) del suelo. Por ello la IE se empleó inicialmente con resultados satisfactorios en estudios de salinidad del suelo (Rhoades, 1976), ya que la concentración de iones en la solución del suelo es el principal factor que afecta a la CEa. En suelos no salinos la CEa depende de otras propiedades como el contenido de humedad, textura o densidad aparente.

En relación al desarrollo y perfeccionamiento de métodos para el sensoramiento de la conductividad eléctrica (CE) (Corwin y Rhoades 1981), indican que por el método no invasivos de la CE del suelo, constituye un tema de gran importancia en los esfuerzos que se realizan para la implementación de métodos de agricultura de precisión, la aplicación de un campo magnético al suelo ha sido empleado en el desarrollo de métodos y medios para el sensoramiento de la CE del suelo parámetros que correlaciona con la salinidad y otras propiedades del suelo.

La conductividad eléctrica de un medio, se define como la capacidad que tienen el medio (que por lo general contiene las sales inorgánicas en solución o electrolitos) para conducir la corriente eléctrica. El agua pura, prácticamente no conduce la corriente, sin embargo el agua con sales disueltas conduce la corrien-

te eléctrica. Los iones cargados positiva y negativamente son los que conducen la corriente, y la cantidad conducida dependerá del número de iones presentes y de su movilidad. En la mayoría de las soluciones acuosas, entre mayor sea la cantidad de sales disueltas, mayor será la conductividad.

La conductividad eléctrica es el recíproco de la resistencia CA en mhos, medida entre las caras opuestas de un cubo de 1.0 cm de una solución acuosa a una temperatura especificada. Esta solución se comporta como un conductor eléctrico donde se pueden aplicar las leyes físicas de la resistencia eléctrica. Las unidades de la conductividad eléctrica son el Siemens/cm (las unidades antiguas, eran los mhos/cm que son numéricamente equivalentes al S/cm).

En la práctica no se mide la conductividad entre electrodos de 1 cm³ sino con electrodos de diferente tamaño, rectangulares, cilíndricos o de diversas formas, por lo cual, al hacer la medición, en lugar de la conductividad, se mide la conductancia, (It/Vt), la cual al ser multiplicada por una constante (k) de cada celda en particular, se transforma en la conductividad en S/cm. En la Figura (2.5), se muestra el principio físico de la conductividad eléctrica y sus ecuaciones.

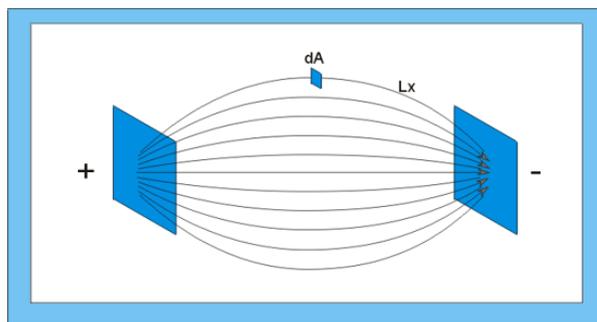


Figura 2.5: Principio físico de la conductividad eléctrica.

$$\frac{1}{Rt} = \frac{1}{Rx_1} + \frac{1}{Rx_2} + \frac{1}{Rx_3} \dots \frac{1}{Rx_n} \quad (2.1)$$

$$R_x = \frac{rlx}{dA} \quad (2.2)$$

De donde:

$$\frac{1}{Rt} = \frac{dA}{r} \left(\frac{1}{lx_1} + \frac{1}{lx_2} + \frac{1}{lx_3} \dots \frac{1}{lx_n} \right) \quad (2.3)$$

$$\frac{It}{Vt} = \frac{1}{Rt} = \frac{1}{r} \int \left(\frac{dA}{L_x} \right) \quad (2.4)$$

$$\frac{It}{Vt} = \frac{1}{Rt} = \frac{1}{r} \int \left(\frac{dA}{L_x} \right) \quad (2.5)$$

Por definicion:

$$C.E. = \frac{1}{r} \quad (2.6)$$

Entonces:

$$C.E. = \frac{1}{Rt_x} \left(\int \left\{ \frac{dA}{L_x} \right\} \right)^{-1} = \frac{It}{Vt_x} \left(\int \left\{ \frac{dA}{L_x} \right\} \right)^{-1} \quad (2.7)$$

En esta última ecuación, It es la conducción eléctrica, It / Vt es la conductancia y la ecuación completa es la conductividad. El último término de la ecuación se denomina constante de celda y depende únicamente de la geometría de la celda y del espacio circundante. Cuando hay alguna pared o barrera que interrumpa el paso de la corriente por el espacio circundante, esta afectará también la constante de celda. Las unidades de la constante de celda son usualmente cm^{-1} . En general, mientras más separados se encuentren los electrodos, menor será el guarismo de la constante de celda.

En la práctica, la conductividad eléctrica de una solución se mide mediante

el uso de una corriente alterna (CA) con el fin de evitar los efectos de la polarización. Cuando se usa una corriente continua (CD) los iones vecinos al electrodo emigran hacia este, produciendo un empobrecimiento de electrolitos en el medio. Esto hace que la conductividad se altere como consecuencia de la variación en la concentración. Este fenómeno se llama polarización de los electrodos y hace imposible medir la conductividad por medio de corriente CD. Por tal motivo los Conductivímetros utilizan una corriente CA, cuya frecuencia varía desde 60 Hz hasta 3000 Hz. En la práctica se recomienda utilizar una corriente alterna con una frecuencia alrededor de 1000 Hz. La forma de señal más utilizada es la onda cuadrada, aunque la eficiencia de esta, es más baja que la onda sinusoidal y más susceptible a interferencias y/o ruido.

Conductivímetro

Calderón (2005) describe el proceso de construcción de un conductivímetro, para lo cual, fue necesario una investigación previa con el fin de determinar la naturaleza de la variable a medir, con que se va a medir, donde se va a visualizar la medida, en que rango va a trabajar el aparato y todas aquellas variables que van a afectar el entorno de medición. Se debe luego establecer la idea de un circuito de medición y realizar las primeras verificaciones como se muestra en la Figura (2.6), con el fin de comprobar la idea inicial.

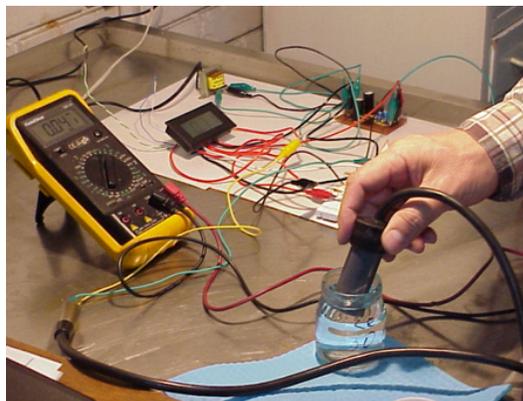


Figura 2.6: Prueba del desarrollo del circuito de un Conductivímetro.

Con el fin de decidir cuál debía ser la frecuencia de operación estudió la frecuencia de oscilación de varios conductivímetros comerciales, para estudiar esta frecuencia utilizó el programa Winscope 2.51, el cual permite utilizar como entrada la tarjeta de sonido del computador y además hace la Transformada Rápida de Fourier y nos indica la frecuencia de la onda.

En conclusión la muestra de conductivímetros ensayados por calderón (2005) se muestran en el Cuadro (2.2) donde se observa las siguientes frecuencias dominantes, algunos con señales sinusoidales otros con señales cuadradas algo ruidosas.

Cuadro 2.2: Frecuencia obtenida con diferentes conductivímetros evaluados por calderón (2005).

Conductivímetro	Frecuencia Nominal(Hz)	Frecuencia Observada (Hz)
Beckman Solubridge	60	59.5
Beckman Solubridge RD-B15	60	61
DIST WP-4	N.D	2696.1
TDS-1	N.D.	7680.8
TDS Test-4	N.D.	3197.2
Metrohm 660 a 2 kHz	2000	1866.9
Metrohm 660 a 300 Hz	300	316.1
Schott Gerate CG-857	N.D.	941.9

Una vez que analizó formas de onda y decidida la frecuencia de oscilación, el paso siguiente fue escoger el tipo de oscilador necesario para lograr este tipo de onda. En la Figura (2.7) se muestra el diagrama de bloques para el conductivímetro desarrollado y en la Figura (2.8) el diagrama electrónico del conductivímetro (Calderón, 2005).

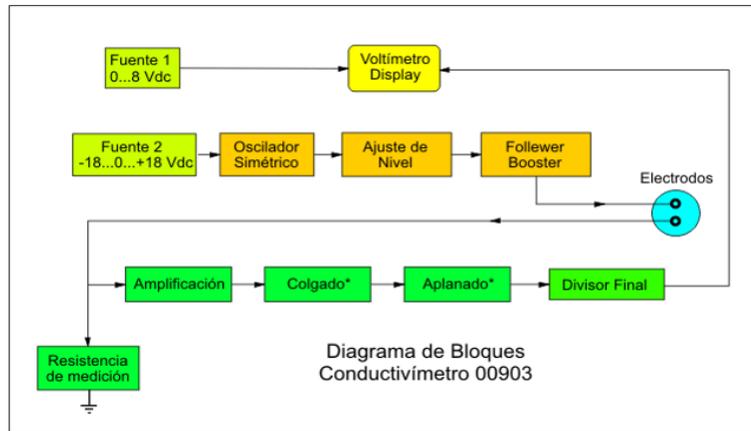


Figura 2.7: Diagrama de bloques del conductivímetro desarrollado por calderon (2005).

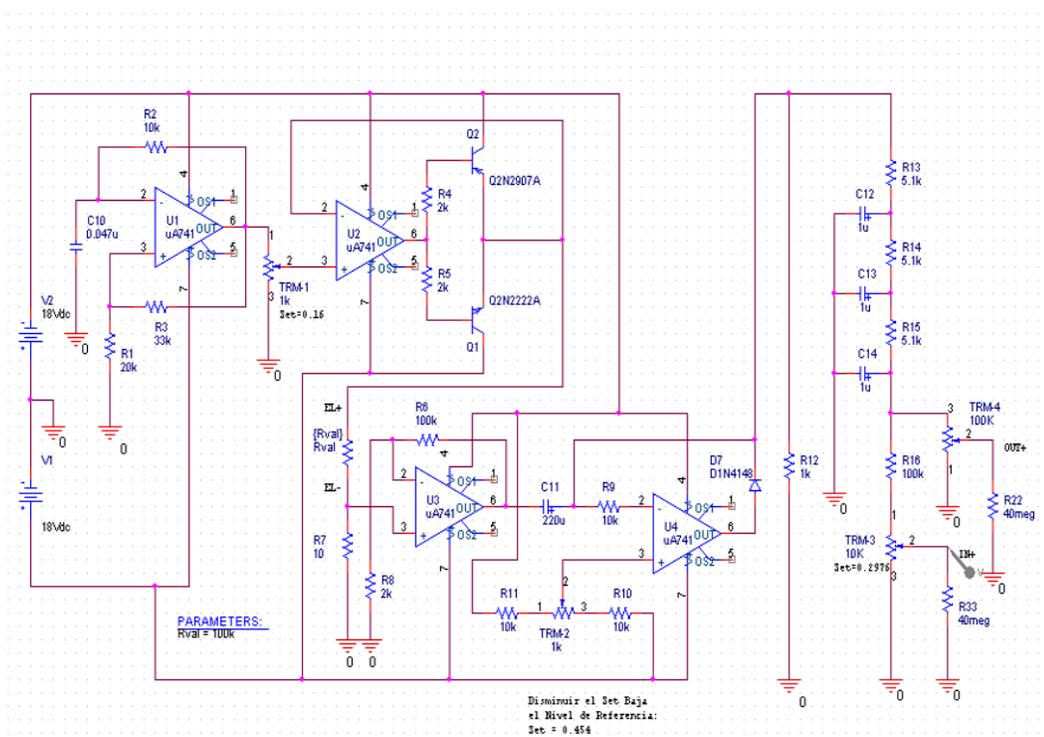


Figura 2.8: Diagrama electrónico de conductivímetro propuesto por Calderón (2005).

2.5.5. Resistividad eléctrica

Método de Frank Wenner

En 1915, el Dr. Frank Wenner del U.S. Bureau of Standards desarrolló la teoría de este método de prueba, y la ecuación que lleva su nombre. Con objeto

de medir la resistividad del suelo se hace necesario insertar 4 electrodos en el suelo. Los cuatro electrodos se colocan en línea recta y a una misma profundidad de penetración, las mediciones de resistividad dependerán de la distancia entre electrodos y de la resistividad del terreno, y por el contrario no dependen en forma apreciable del tamaño y del material de los electrodos, aunque sí dependen de la clase de contacto que se haga con la tierra. El principio básico de este método es la inyección de una corriente directa o de baja frecuencia a través de la tierra entre dos electrodos C1 y C2 mientras que el potencial que aparece se mide entre dos electrodos P1 y P2. Estos electrodos están enterrados en línea recta y a igual separación entre ellos. La razón V/I es conocida como la resistencia aparente. La resistividad aparente del terreno es una función de esta resistencia y de la geometría del electrodo.

En resumen se puede decir que este método, se basa en la aplicación del principio de caída potencial, donde se toman cuatro electrodos (A, P1, P2, B), ubicados en una línea recta, separados a una distancia "a" entre ellos (Figura 2.9)

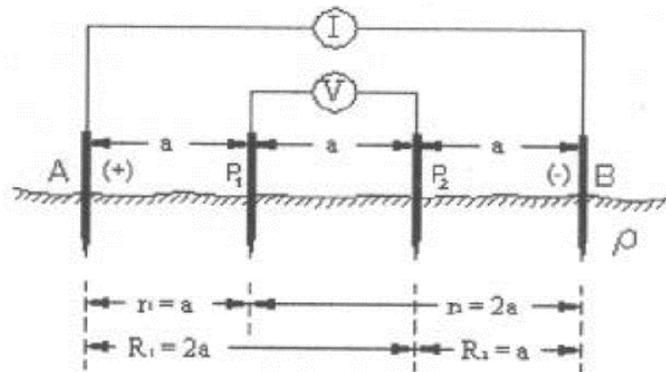


Figura 2.9: Método de Wenner para medir la conductividad eléctrica del suelo.

En la Figura (2.9), se observa esquemáticamente la disposición de los electrodos, en donde la corriente se inyecta a través de los electrodos exteriores y el potencial se mide a través de los electrodos interiores. La resistividad aparente está dada por la siguiente expresión:

$$\rho = 2\pi \frac{V}{I} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right)^{-1} = 2\pi \left\{ \frac{Va}{I} \right\} \quad (2.8)$$

2.5.6. Humedad del suelo

La determinación del contenido de agua en el suelo o cualquier otro sustrato 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).

Sensores Time Domain Reflectometry (TDR)

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, V_p , de la onda generada por el TDR viene dada por:

$$V_p = \frac{L}{t} \quad (2.9)$$

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:

$$V_p = \frac{2L}{t} \quad (2.10)$$

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:

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{K}} \quad (2.11)$$

Donde c es la velocidad de la luz en el vacío y K la constante dieléctrica relativa del medio. Igualando las ecuaciones (2) y (3), y despejando K, resulta:

$$K = \left(\frac{ct}{2}\right)^2 \quad (2.12)$$

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, θ (cm³.cm⁻³):

$$\theta = -5,3x10^{-2} + 2,92x10^{-2}K - 5,5x10^{-4}K^2 + 4,3x10^{-6}K^3 \quad (2.13)$$

La universalidad de esta ecuación ha permitido la utilización del TDR en suelos muy diferentes y ambientes contrastados.

La técnica TDR ofrece una serie de ventajas entre las que destacan la rapi-

dez 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).

Sensor de Capacitancia para Medir Simultáneamente Salinidad y Contenido Hídrico

Ritter y Regalado (2007) describen un proceso de medición de humedad a través de los sensores dieléctricos de capacitancia constituyendo un método alternativo para determinar el contenido hídrico en la zona no saturada, por ser instrumentos no contaminantes, de fácil manejo y de costo relativamente bajo que proporcionan medidas instantáneas y de forma poco destructiva.

Algunos de estos sensores comerciales han sido adaptados para realizar lecturas simultáneas del contenido volumétrico de agua (θ) y de la conductividad eléctrica aparente del suelo (σ) en el mismo volumen de muestra. Sin embargo, como consecuencia de la baja frecuencia de trabajo que usan estos sensores, se plantean dudas sobre la exactitud con la que estas variables pueden determinarse simultáneamente. Estudios previos han evaluado la eficacia del sensor comercial WET Sensor (Delta-T Devices Ltd., Burwell, Gran Bretaña) en suelos forestales de origen volcánico, encontrando que mientras que el WET Sensor estima de forma correcta la conductividad eléctrica del medio, la lectura de permisividad relativa, y por tanto del contenido de humedad se ve alterada por σ de forma importante.

La estimación de la conductividad eléctrica de la solución (σ_w) a partir θ y σ según el modelo que utiliza el fabricante, tampoco es satisfactoria. En el trabajo desarrollado por Ritter y Regalado (2007). Se estudia si estos resultados obteni-

dos para suelos volcánicos, para los cuales es conocido su carácter dieléctrico atípico, se producen también en un medio homogéneo tal como una arena gruesa.

Los resultados indican que además de los suelos volcánicos estudiados, en la arena, la estimación de θ y σ_w , a partir de las lecturas del WET Sensor y de los modelos que propone el fabricante, no es exacta. Sin embargo, en la arena estos errores son inferiores a los que se observan en los suelos volcánicos. Tanto para la arena, como para los suelos volcánicos estudiados, se proponen modelos alternativos a los que utiliza el fabricante para la determinación de θ y σ_w : uno para la estimación de σ_w y otro para determinar θ teniendo en cuenta la influencia de σ sobre la medida de permisividad que se obtiene con el WET sensor.

Self Balance Impedance Bridge, un método alternativo al TDR para la determinación de la humedad edáfica

La técnica del SBIB permite separar ambas partes, la real y la imaginaria, de la constante dieléctrica midiendo la impedancia compleja que presentan los dos electrodos que constituyen la sonda. La impedancia de un medio se define como la relación entre el campo eléctrico y el campo magnético en una onda plana (Simón *et al.*, 1974).

Dado que la constante dieléctrica es una magnitud compleja, la impedancia y la admitancia ($Y=1/Z$) también lo serán. Expresando la admitancia en forma compleja ($Y=a+jb$) obtenemos una expresión equivalente al circuito de la Figura 2.10. Que formarían un condensador en paralelo con una resistencia (Ecuación 2.14).

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + jwC \quad (2.14)$$

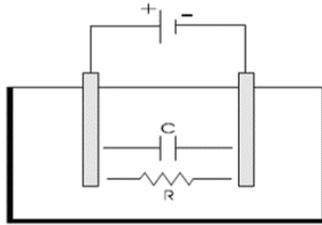


Figura 2.10: Comportamiento eléctrico de electrodos inmersos en un material

La resistencia está asociada a la conductividad del suelo, es decir, a la parte imaginaria de la constante dieléctrica. La capacidad está asociada a las propiedades dieléctricas del material, la parte real de la constante dieléctrica y por tanto a la humedad del suelo. Si medimos la impedancia como parte real e imaginaria podemos separar perfectamente las medidas de humedad y conductividad del suelo. Para medir dicha impedancia el SBIB utiliza un puente de impedancias.

El funcionamiento de este circuito se muestra en la Figura (2.11a), este es equivalente al de una balanza y se utiliza para detectar desequilibrios entre las impedancias $R1$ y $R2$. Cuando $R1=R2$ se dice que el puente está equilibrado (la señal de desequilibrio del puente V_{12} es 0).

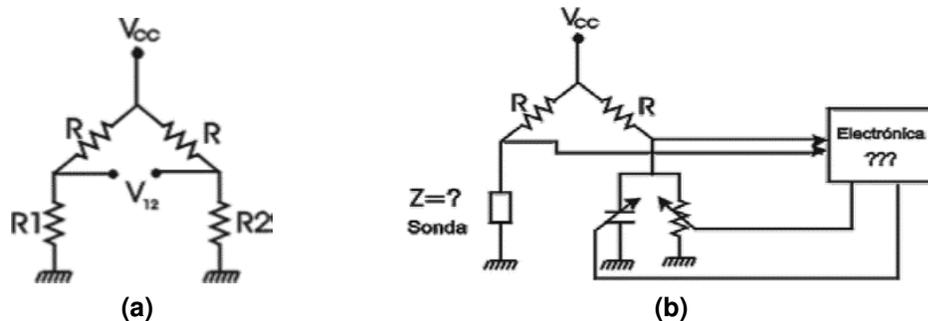


Figura 2.11: Puentes: a)resistivo y b)impedancia (Magan, 2002)

En la Figura (2.11b), se observa cómo se utiliza el puente de impedancias en el SBIB para medir la impedancia (Z) de la sonda. Un circuito electrónico se encarga de medir la señal de desequilibrio del puente (V_{12}) y de actuar sobre un condensador y una resistencia variable. Cuando $V_{12}=0$, es decir, el puente

está en equilibrio, las señales de control del condensador y resistencia variables nos indican el valor de la conductividad y la capacidad equivalente. La frecuencia de funcionamiento del SBIB es de 50MHz.

Esta frecuencia es lo suficientemente alta como para que la parte reactiva y la resistiva de la impedancia tengan valores similares y se alcance el equilibrio del puente con facilidad. Además, es lo suficientemente baja como para no tener pérdidas en el dieléctrico debidas a fenómenos de relajación, correspondiendo la parte resistiva de la constante dieléctrica únicamente a la conductividad del suelo.

Para minimizar efectos parásitos como variaciones con la temperatura u otros efectos como la degradación de los electrodos, el circuito se complementa con un sistema de Chopping o conexión y desconexión de los electrodos a una frecuencia de 300Hz. De esta manera la señal de desequilibrio del puente es amplificada diferencialmente entre el estado de sonda conectada y desconectada. Al realizar una medida diferencial las variaciones debidas a derivas térmicas o envejecimiento se minimizan. (Magan *et al.*, 2002).

El SBIB está dotado con un sensor de temperatura para corregir las variaciones de la constante dieléctrica del agua con la temperatura. Cualquier método basado en la medición de la constante dieléctrica debería realizar una corrección con la temperatura si quiere alcanzar precisiones por debajo del 1%. La Ecuación (2.15) muestra la dependencia de la constante dieléctrica del agua con la temperatura (Roth *et al.*, 1990).

$$\varepsilon = 78,54(1 - 4,579x10^{-3}(t - 25) + 1,19x10^{-5}(t - 25)^2 - 2,8x10^{-8}(t - 25)^3) \quad (2.15)$$

2.6 Desarrollo de sensores aplicados en la agricultura

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 (2.3).

Cuadro 2.3: Sensores disponibles para el análisis dinámico de suelos y atributos evaluados con cada uno de ellos. (Adamchuk *et al.*, 2004).

Sensores	Textura	MO	% Hum	Compac	LS	pH	N	CIC
Eléctricos y EM	X	X	X		X		X	X
Ópticos	X	X	X			X	X	
Mecánicos				X	X			
Electro-químicos					X	X	X	

2.6.1. 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 2.12), 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 π^3 .

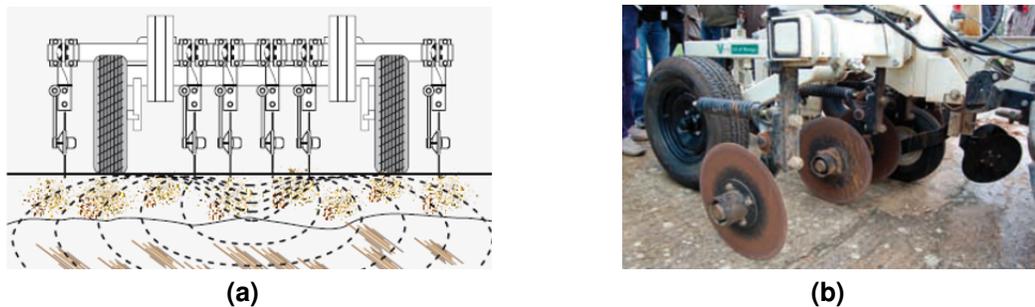


Figura 2.12: Disposición de los electrodos en equipos (a) ERDC3100 VERIS correspondiente a una configuración Wenner y (b) ARP GEOCARTA.

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 2.12). 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-dipole) 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 EMhorizontal y EMvertical

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 (2.13) muestra un ejemplo de mapeado de la ECa.

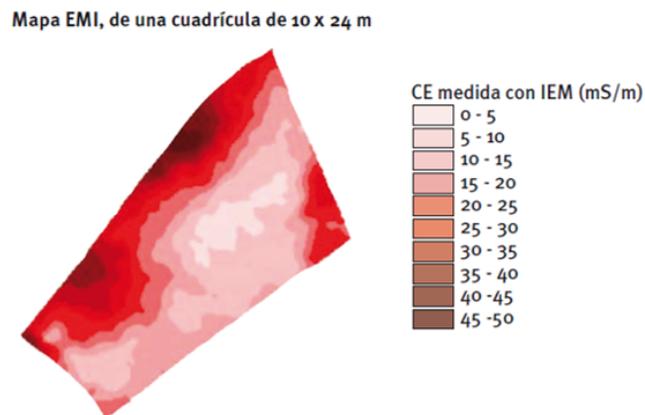


Figura 2.13: Ejemplo de un mapa de conductividad eléctrica aparente (ECa) obtenido con un equipo EM38.

2.6.2. 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 2.14). 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 2.14: Sistema de tratamiento en tiempo real con sensor de vegetación situado delante del tractor.

2.6.3. 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 penetrometro (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 2.15) 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.*, 2001b).

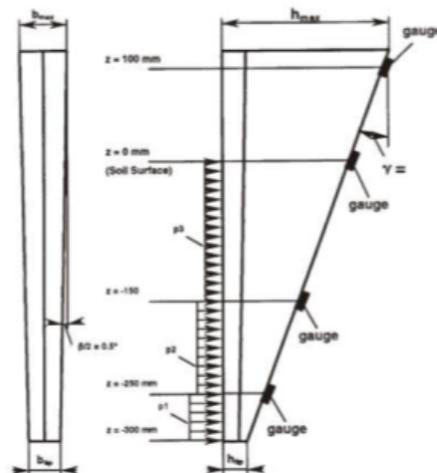
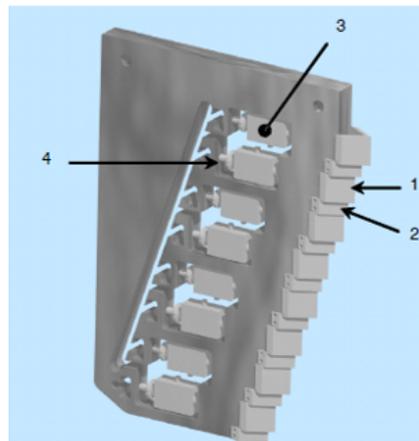


Figura 2.15: Sistema de tratamiento en tiempo real con sensor de vegetación. Esquema ilustrativo de cuchilla plana desarrollada por Adamchuk (2001b).

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.



- 1) celda activa
- 2) elementos de corte en secuencia
- 3) elementos de detección de carga
- 4) dispositivos de protección de sobrecarga.

Figura 2.16: Modelo CAD del sensor de perfil de la compactación del suelo (SCP).

2.7 Diseño de transductores

Los 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 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).

2.7.1. Análisis teórico del diseño del transductor 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 (2.17) se muestra las fuerzas actuando en un elemento del anillo; donde el momento flexionante ($M\theta$) a cualquier punto en el anillo es calculado y es dado

por la Ecuación (2.16).

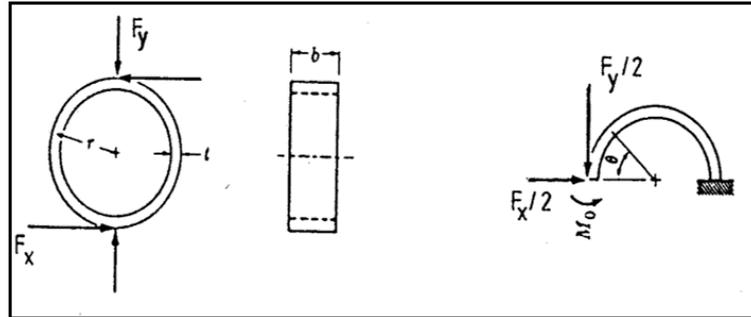


Figura 2.17: Fuerzas actuando en un elemento del anillo.

$$M\theta = \frac{1}{2}Fxr\left(\sin\theta - \frac{2}{\pi}\right) - \frac{1}{2}Fyr\cos\theta \quad (2.16)$$

La colocación del nodo para cada fuerza individual involucrada en el elemento del anillo se encuentra cuando el momento producido por $1/2 F_x$ se vuelve cero y esto es verdadero cuando $\sin\theta$, ($\theta = 39.6$). El momento debido a $1/2F_y$ es cero cuando $\cos\theta(\theta=0)$, ($\theta= 90$).

Como resultado de este análisis, las dos colocaciones de nodo de deformación son: ($\theta= 39.6$) para la fuerza (F_x) y ($\theta= 90$) para la fuerza (F_y). La deformación esperada (ε), producida por el momento en el anillo de carga se obtuvo y está dado por las ecuaciones (2.17) y (2.18) siguientes:

$$\varepsilon_{39,6} = \frac{2,31F_yr}{Ebt^2} \quad (2.17)$$

$$\varepsilon_{90} = \frac{1,09F_xr}{Ebt^2} \quad (2.18)$$

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 (2.19) y (2.20) siguientes:

$$\varepsilon_{22,6} = \frac{2,66Fyr}{Ebt^2} \quad (2.19)$$

$$\varepsilon_{90} = \frac{1,13Fxr}{Ebt^2} \quad (2.20)$$

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 nudos de deformación, cosa que 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 nudos 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 nudos de deformación para la fuerza horizontal (Fx), corrigiendo así la localización del nudo de deformación producido por la componente horizontal localizándose a $\theta = 39 \frac{1}{4}$ y se encontró que las sensibilidades para cada nudo de deformación dada en las Ecuaciones (2.21) y (2.22) siguientes:

$$\varepsilon_{39,25} = \frac{2,24Fyr}{Ebt^2} \quad (2.21)$$

$$\varepsilon_{90} = \frac{2,12Fxr}{Ebt^2} \quad (2.22)$$

2.7.2. Sensor de anillo Extendido (EOR)

Los transductores octagonales de anillo extendidos han sido desarrollados como los que se muestran en la Figura (2.18); 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).

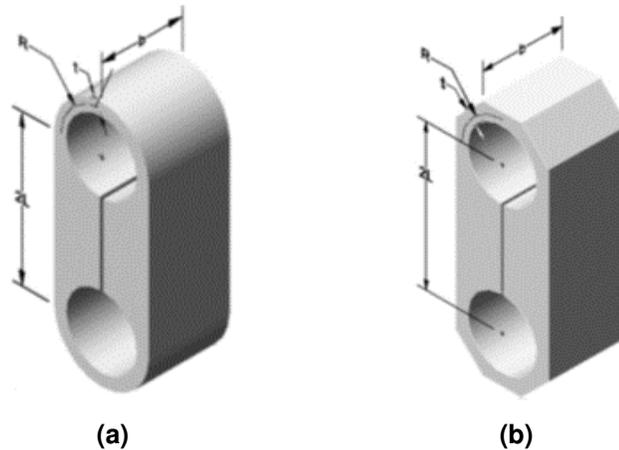


Figura 2.18: Transductores de tipo anillo: (a) anillo liso extendido; (B) anillo octagonal extendido (EOR).

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.

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, baja 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 octagonal extendida. Informó de una buena linealidad, baja histéresis 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.*, (1993) diseñó un dinamómetro utilizando dos (EOR) para medir las fuerzas y momentos ejercidos en herramientas de labranza. Utilizaron dos (EOR) 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 %.

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 el las fuerzas de tiro y verticales respectivamente.

2.7.3. 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 2.19). 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).

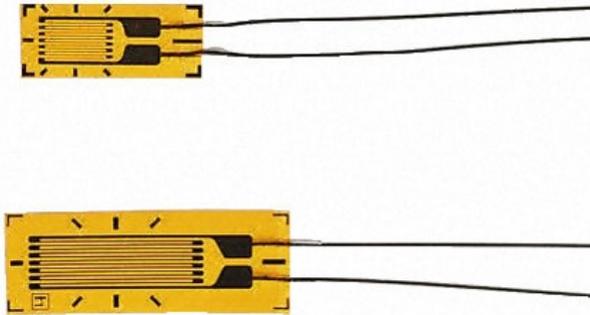


Figura 2.19: Galgas extensiométricas.

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:

ecuacion

$$\varepsilon = \frac{dL}{L} = \frac{\sigma}{E} \quad (2.23)$$

Según la Ecuación (2.23) 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:

ecuacion

$$\frac{dL}{L} = K\varepsilon \quad (2.24)$$

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

ecuacion

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.25)$$

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.

2.7.4. Puente de Wheatstone

Es un dispositivo eléctrico que es normalmente usado para medir $\varepsilon K = dR/R$ 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 (2.20). El puente de Wheatstone puede determinar lecturas de galgas de tensión dinámica y estática. El voltaje de excitación puede ser CA o DC.

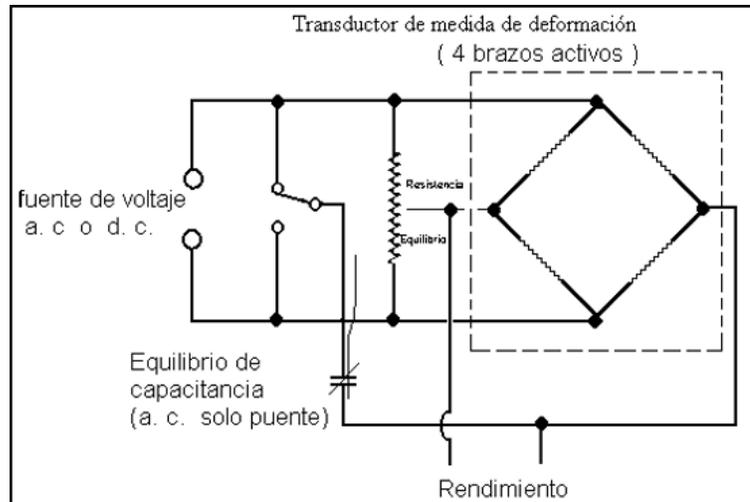


Figura 2.20: Puente de Wheatstone (Godwin, 1993)

De esto se puede desprender la Ecuación (2.26).

ecuacion

$$V = \frac{U \cdot FG \cdot n \cdot \varepsilon}{4} xGain \quad (2.26)$$

2.7.5. Sistema de adquisición de datos

Los sistemas de adquisición de datos se utilizan para medir y registrar señales obtenidas básicamente de dos maneras: a) aquellas que se originan a partir de la medición directa de cantidades eléctricas, que pueden incluir voltaje de corriente directa (CD) y corriente alterna (AC), frecuencia o resistencia; suele hallarse en las áreas de prueba de componentes electrónicos, estudios ambientales y trabajos de control de calidad. b). Señales que se originan a partir de transductores, como galgas extensiométricas y termopares.

Campos *et al.*, (2000), describen la necesidad de un sistema de alta veloci-

dad de muestreo para la reproducción de las fuerzas de reacción del suelo que incluye transductores de magnitudes de fuerzas y su localización.

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.
4. 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.
5. Etapa Intermedia, modifica la señal que proviene del transductor, ya sea por amplificación, filtrado u otros medios para tener una salida deseable.
6. Etapa final o terminal, indica, graba o controla la variable que se desea medir.

En cuanto al hardware en varias investigaciones se puede identificar en todas y cada una de ellas, un sistema de acondicionamiento de señales prove-

nientes 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 para 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, se cuenta con 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 utiliza la metodología del algoritmo de la transformada rápida de Fourier para la obtención de la potencia espectral.

Lickso y Harrison (1988) y Campos (1995) describieron la necesidad de un sistema de alta velocidad de muestreo para la reproducción de la fuerza de reacción del suelo, que incluye transductores de magnitudes de fuerzas y su localización, acondicionadores de señales y convertidores analógicos digitales.

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 para poder mapear la demanda de energía en la operación de campos 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, acres trabajado, el consumo de combustible por hora, el consumo de combustible por hectárea, acres 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 en campo. En la Figura (2.21) se muestra el diagrama de bloques en donde se ven los componentes del sistema de adquisición de datos.

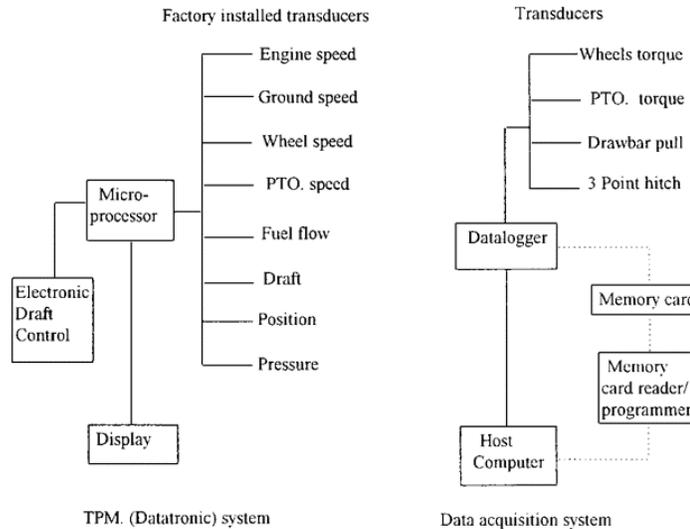


Figura 2.21: Diagrama de bloques del sistema de instrumentación completo del tractor (Kheiralla y Azmi, 2002).

DaqBook 2000

El DaqBook200/2000 (Figura 2.22) 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 2.22: Dispositivo de adquisición de datos DAQBOOK/2000.

La serie DaqBook200/2000 incluye una conexión Ethernet (red de área local) integrada que proporciona la transmisión continua a la PC sin pérdida de datos 16 bits, 200 kHz convertidor A / D Expandir analógico y el número de canales digitales con opciones de expansión DBK Powerable de 10 a 30 VDC, o con el adaptador de CA incluido medidas analógicas, digitales y de frecuencia síncronos cuatro canales de 16 bits.

Capítulo 3

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Acondicionamiento del carro porta sensores

Se adecuó una estructura o marco que pertenece a un equipo de arado comercial modelo MCC 3/5/7 de la empresa TECNOMEC AGRÍCOLA S.A de C.V., con la finalidad de acondicionar el carro porta sensores, el cual, está integrado por un sistema con un actuador hidráulico utilizado para controlar la profundidad de muestreo hasta 60cm (Figura 3.1), dos ruedas o llantas para su desplazamiento, un enganche del tercer punto para su acoplamiento al tractor y un chasis base donde se ubican los tres sensores. El desarrollo de este equipo tuvo como objetivo realizar el diagnóstico de parámetros físicos del suelo (RP, PE y RC) a través de muestreo tipo puntual.

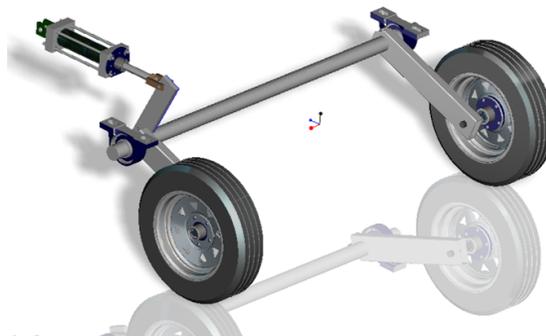


Figura 3.1: Diseño en Pro-E del mecanismo de control de profundidad del carro-portasensores.

3.2 Desarrollo del Penetrómetro

En el desarrollo del penetrómetro se realizó la integración de dos sensores: para la medición de la fuerza (RP) y profundidad de penetración, respectivamente. El primero es un transductor de anillo con capacidad de 10 KN y el segundo es un sensor de profundidad para mediciones de 0-500mm. A continuación se describe el desarrollo de cada uno de ellos.

3.2.1. Desarrollo del transductor para medición de fuerza de RP

Diseño del transductor y sonda de cono

Se diseñó un sensor con capacidad de 10 KN para un rango de medición de hasta 9 MPa, este sensor está integrado por un transductor de fuerzas tipo anillo y una herramienta de cono. Para las consideraciones de diseño del sensor de anillo se empleó el método desarrollado por Campos (1993). En el diseño del ring se utilizaron las siguientes Ecuaciones (3.1) y (3.2) para calcular el esfuerzo flexiónate y el factor de seguridad.

$$\sigma = \frac{6Fr}{bt^2} \quad (3.1)$$

$$F_s = \frac{\sigma p}{\sigma_1} \quad (3.2)$$

La Ecuación (3.3) fue utilizada para determinar la sensibilidad de las galgas del ring de acuerdo a las dimensiones anteriores para la fuerza vertical.

$$\varepsilon_{90} = \frac{1,09Fxr}{Ebt^2} \quad (3.3)$$

Para la punta cónica con área de 0.00105453 m, se utilizó la normalizada por la Asociación Americana de Ingenieros Agrónomos (ASAE, 2002a). La norma S. 313.3, especifica que el cono debe tener un ángulo 30 como se muestra en la Figura (3.2).

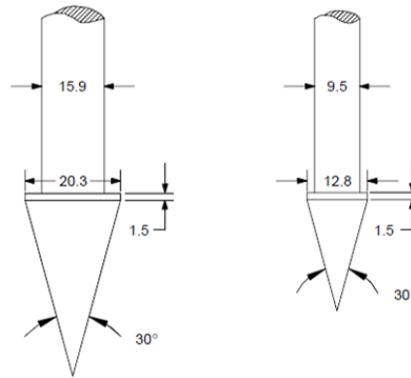


Figura 3.2: Puntas normalizadas por ASAE (2002a).

Montaje de galgas extensiométricas

Las galgas extensiométricas montadas en el anillo del ring fueron de 350 Ohms (Ω) de la empresa KYOWA, empleando para su montaje el procedimiento descrito por Sakurai (1996).

Se empleó un arreglo de puente completo de Wheatstone, como el que se muestra en la Figura (3.3), para realizar la medición en el cambio de resistencia de las galgas, permitiendo medir cargas estáticas y dinámicas.

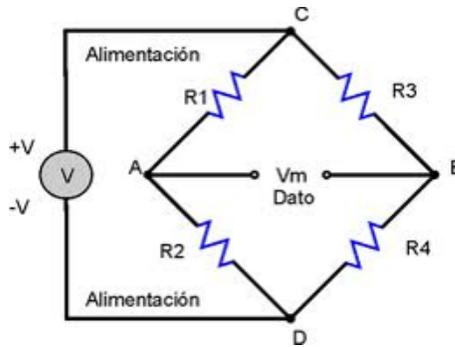


Figura 3.3: Configuración de las galgas en el puente de Wheatstone.

Adquisición de datos

Para el registro de datos, se realiza la conexión del sensor y la comunicación de éstos, con los equipos de adquisición. Al-Janobi and Al-Suhaibani (1995), implementaron un paquete de instrumentación móvil para el tractor MF-3090 que constaba de un monitor y un sistema de registro de datos de parámetros de rendimiento del tractor e implementos en un amplio rango de operaciones. De lo anterior, se debe considerar que el sensor consta de conectores (hembra macho) para así poder comunicar el transductor (anillo) al amplificador-acondicionador. A continuación se describe una guía rápida para la conexión del sistema de adquisición de datos:

1. Se conecta el transductor a través de cables a los canales seleccionados del amplificador DBK-43a (dependiendo del número de variables a monitorear), así mismo, el amplificador se conecta al acondicionador de señales DaqBook/2000.
2. En el DaqBook/2000 se conecta el cable que comunica al módulo con el puerto de red LAN de la computadora para realizar el registro y se colocan los cables de alimentación. Posteriormente se conecta el cable de alimentación que va de la batería del DaqBook/2000 y se enciende el DaqBook/2000 y el DBK-43a.

3. Con el equipo ya encendido y conectado se ejecuta en la PC el software DaqView V 9.1.27, en este momento el sistema de adquisición de datos ya está activado.

Calibración

Para efectuar las pruebas en campo, se requiere previamente calibrar el sensor bajo condiciones de laboratorio, esto es, determinar la relación voltaje–fuerza.

A continuación se describe el proceso de calibración:

Se instaló el DaqBook/2000 en laboratorio activando el programa DaqView 9.1.27., donde se realiza el ajuste de los parámetros de ganancia del amplificador DBK-43a con los valores mostrados en el Cuadro (3.1).

Cuadro 3.1: Ajuste de parámetros en el amplificador DBK-43a para la calibración del sensor.

Parámetro	Voltaje (V)
Voltaje de excitación	9.5
Input Gain	4.5
Scaling Gain	4.5

Se colocó el sensor de fuerza con una capacidad de 10 KN en un tripié como se muestra en la Figura 3.4. Para la calibración del sensor en laboratorio, se registraron 5 repeticiones.

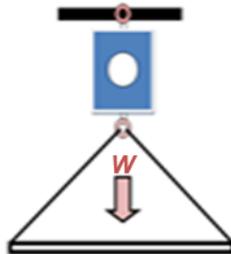


Figura 3.4: Diagrama de calibración del sensor de resistencia a la penetración.

En el Cuadro (3.2) se muestran los pesos conocidos que se colocaron dentro de la canasta, las corridas se registraron agregando y quitando los pesos en cada repetición. Para la realización de las pruebas se hizo un registro en el Daq-Book/2000 con un total de 6000 datos a una frecuencia de 20 Hz.

Cuadro 3.2: Pesos aplicados en la calibración del sensor de fuerza.

Pesos	Kg	Newton	Newton Acumulados
W1	45	441.4	441.4
W2	45	441.4	882.9
W3	45	441.4	1324.3
W4	35	343.3	1667.7
W5	35	343.3	2011
W6	30	294.3	2305.3

En el Cuadro (3.3) se muestra la secuencia de ascenso y descenso de los pesos con registro de 500 datos por cada peso.

Cuadro 3.3: Secuencia de ascenso y descenso de los pesos para la calibración.

No. Datos	peso aplicado	
	Ascenso (N)	Descenso(N)
0	0	
500	441.45	
1000	882.9	
1500	1324.35	
2000	1667.7	
2500	2011.05	
3000	2305.35	
3500		2011.05
4000		1667.7
4500		1324.35
5000		882.9
5500		441.45
6000		0

Posteriormente, los datos registrados de la calibración se graficaron en el programa Excel para su verificación y se obtienen los promedio de valores de la deformación en mV. Con los valores obtenidos de mV Vs Newton se genera la

ecuación de calibración empleando la facilidad de regresión del software Minitab V16.

3.2.2. Desarrollo del sensor de medición de profundidad

El sensor para la medición de profundidad fue diseñado para mediciones en un rango de 0 a 600 mm y está integrado por un sensor de distancia 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 de datos.

Sensor LV-MaxSonar-EZ1

El sensor ultrasónico LV-MaxSonar-EZ1 (Figura 3.5a) tiene el diagrama de haz más ancho y más sensible de todos los LV-Max-Sonar. Es específico para aplicaciones robóticas y de control industrial, ya que posee muy buenas características de funcionamiento y robustez en cuanto a mediciones se refiere. El sensor proporciona lecturas muy precisas a partir de 0.20 a 6.45 m. con una resolución de 1 cm. Este sensor puede ser alimentado con voltajes entre 2.5 y 5 VDC.

Características:

1. Sensor de ultrasonido de 42 kHz
2. Funciona a partir de 2.5- 5.5 V
3. Bajo consumo de corriente 2 mA
4. Tasa de lectura de 20 Hz
5. Salida analógica- 10mV/pulg

Antes de iniciar las pruebas se acondicionó el sensor, se conectaron 3 de las 7 entradas con las que cuenta el sensor que serán GND (tierra) ,5 Volts y AN como se muestra en la Figura (3.5b).



Figura 3.5: a) Sensor y b) conexiones del sensor LV-MaxSonar-EZ1.

Amplificador de instrumentación AD620AN

Una vez realizadas correctamente las conexiones del sensor LV-MaxSonar-EZ1; se evaluó el amplificador de instrumentación AD620AN el cual se muestra en la Figura (3.6). Es un circuito electrónico capaz de incrementar, disminuir o simplemente reproducir una señal.

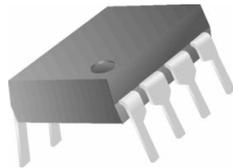


Figura 3.6: Amplificador AD620AN.

Las principales características que han servido como criterio de elección del AD620 son:

1. Ganancia ajustable con resistencia externa.
2. Rangos de ganancia de 1 a 1000.
3. Bajo consumo, 1.3mA max., perfecto para aplicaciones portátiles.
4. Bajo ruido.

5. Bajo costo.

Para el ajuste de la ganancia, el fabricante proporciona las siguientes ecuaciones:

$$G = \frac{49,4K\Omega}{R_G} + 1 \quad (3.4)$$

Por tanto, el valor de R_G en función de la ganancia será:

$$R_G = \frac{49,4K\Omega}{G - 1} \quad (3.5)$$

En el ANEXO (A) se muestran características de resistencias conocidas para las ganancias. En la Figura (3.7) se observa el diagrama de conexión que se utilizó para el diseño del circuito.

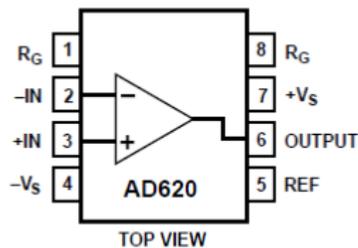


Figura 3.7: Diagrama de conexión del amplificador.

El AD620AN también presenta una configuración para funcionar como filtro, en el diagrama en la Figura (3.8), se puede observar donde se realiza la combinación de resistencia-capacitor.

El cálculo de las resistencias de los filtros con las siguientes formulas:

$$RC = \frac{1}{2\pi f} \quad (3.6)$$

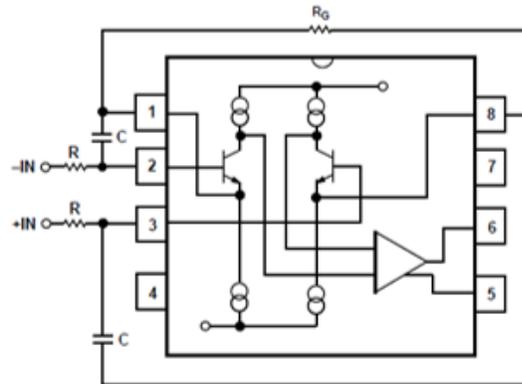


Figura 3.8: Diagrama de conexión del amplificador configurado como filtro.

Donde $f \geq$ al ancho de banda y el capacitor debe ser menor a $C \leq 150 \text{ pF}$ R: resistencias, C: capacitor. f=frecuencia.

Diseño del circuito electrónico

Una vez que se revisaron las conexiones correctamente del sensor y amplificador AD620AN, se diseñó un circuito electrónico en el programa ARES PROTEUS 8.0 profesional para el LV-MaxSonar-EZ1, los amplificadores de instrumentación AD620 en serie con configuración de filtro y un filtro pasa-bajo como se muestra en la Figura (3.9).

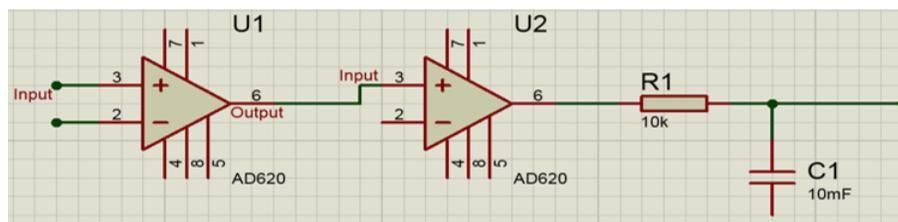


Figura 3.9: Diagrama de conexión de los amplificadores AD620 en serie con configuración de filtro y filtro paso bajo.

Calibración

Para realizar las pruebas en campo se requiere previamente calibrar el sensor bajo condiciones de laboratorio, esto es, determinar la relación voltaje–distancia. A continuación se describe el proceso de calibración. Después de haber diseñado el circuito, el sensor se coloca frente una lámina reflectora ubicada a una distancia inicial de referencia de 200mm (figura 3.10). Las medidas de referencia de inicio serán a partir de la información proporcionada en la hoja de datos del sonar (ANEXO, B).

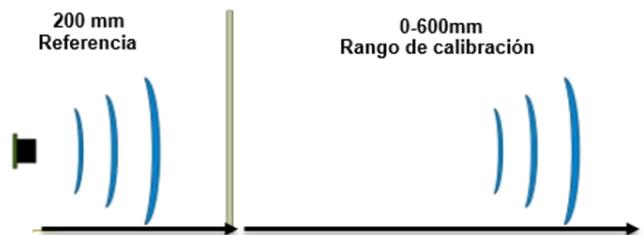


Figura 3.10: Diagrama de calibración del sensor para la medición de profundidad.

Se registraron en el DaqView 9.1.27, 10500 datos a una frecuencia de 20 Hz. Cada 500 datos se desplazó 50 mm la lámina reflectora en forma manual y así, de manera continua hasta llegar al desplazamiento máximo de 500mm, los datos se registraron de ida y regreso. Posteriormente los datos obtenidos se graficaron en el programa Excel para su verificación de registro y se obtuvieron los promedios de valores al cambio de distancia en mV. Con los valores de mV Vs mm se generó la ecuación de calibración empleando la facilidad de regresión del software Minitab V16.

Evaluación del porcentaje de ruido del sensor

Una vez realizadas las pruebas de calibración de los amplificadores en serie como filtro, se procedió a realizar el cálculo del valor del porcentaje de ruido para las señales del sensor. Esto es, para verificar la nitidez de la señal obtenida

comparada con respecto a la del equipo de adquisición de datos daqbook/2000.

Evaluación en campo

Las evaluaciones se realizaron en el campo experimental, “Rancho Navidad”, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicado en el estado de Nuevo León, México. Con coordenadas 250150.88N y 1003735.65, con una altitud de 1884 MSNM. Las evaluaciones en campo fueron llevadas a cabo en un suelo de textura MIGAJON con contenidos medios de 42 % arena, 36 % limo y 22 % de arcilla, humedad promedio del 15 % y densidad aparente de 1.07g/cm³. El tamaño de la parcela de prueba fue de una hectárea, con un total de treinta puntos de muestreo (Figura 3.11).

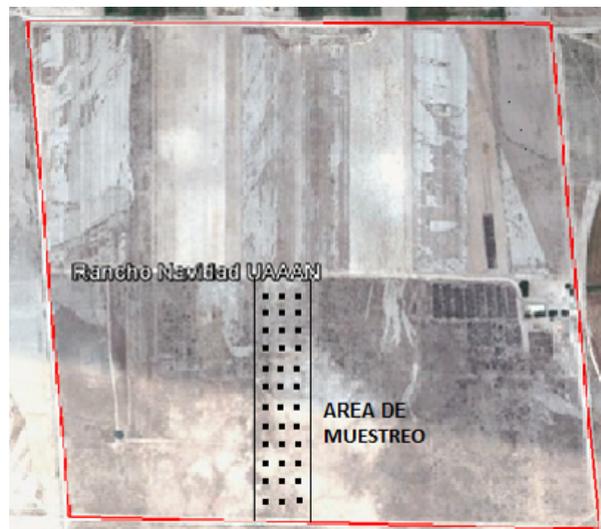


Figura 3.11: Área de muestreo de 30 puntos.

Análisis de la información y generación de mapas de diagnóstico

Después de haber obtenido los datos en campo, se procesa la información para obtener resultados de RP y se utiliza la Ecuación (3.7):

$$P = \frac{F}{A} \quad (3.7)$$

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. Esto fue al igualar a cero ambas gráficas y obtener los valores correspondientes para las profundidades deseadas. Para cada profundidad se realizó un mapa de diagnóstico con ayuda del software GS+ V9, utilizando el método de interpolación IDW (Inverse Distance Weighting). El proceso de elaboración del mapa en el software GS+, se muestra en el ANEXO (C).

Para el análisis de la variabilidad se determinó la media, mediana, el valor máximo, el valor mínimo, coeficiente de variación (CV). En cuanto al análisis del CV se tomó el criterio de Warrick y Nielsen (1980), que considera la siguiente clasificación de variabilidad: baja para CV menores de 12%, media entre 12 y 60 % y alta para CV mayores a 60 %.

3.3 Desarrollo del sensor para la medición de la permisividad eléctrica del suelo

El objetivo de este sensor es realizar mediciones de porcentaje de humedad o conductividad eléctrica del suelo, a través del desarrollo de un sensor capacitivo o resistivo.

3.3.1. Diseño y evaluación de sensibilidad

Para la realización del diseño del sensor se tiene como referencia lo realizado por Magan (2002). El cual se basa en un puente de impedancias como se

muestra en la Figura (3.12).

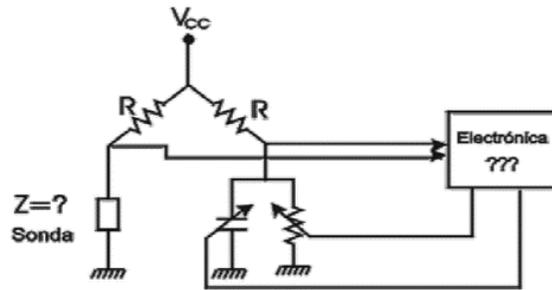


Figura 3.12: Puente de Impedancia (Magan 2002).

A diferencia del circuito de referencia se propuso diseñar un sensor basado en el funcionamiento de un puente de Wheatstone. Como se muestra en la Figura (3.13). Esto es para obtener mayor sensibilidad de medición.

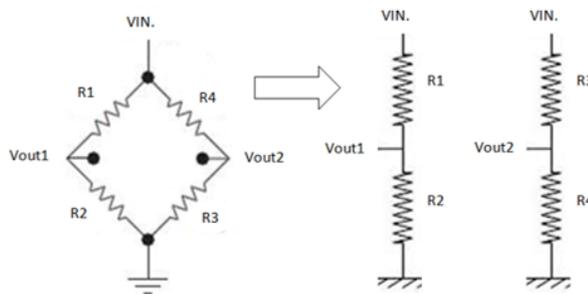


Figura 3.13: Puente de Wheatstone.

El puente de Wheastone consta de la combinacion de 4 resistencias donde dos de ellas forman la mitad del puente de referencia (Vout1) y las otras dos forman la varibilidad de la medicion de humedad y conductividad del suelo (Vout2). El circuito funciona como un puente resistivo o capacitivo para conductividad-humedad respectivamente.

Para tener la mayor sensibilidad del sensor (mínima magnitud en la señal de entrada requerida para producir una determinada magnitud en la señal de salida) se propuso realizar cuatro combinaciones posibles. Las cuales se pueden observar en la Figura (3.14).

Para esto se diseñaron unas probetas, una de las cuales se observa en

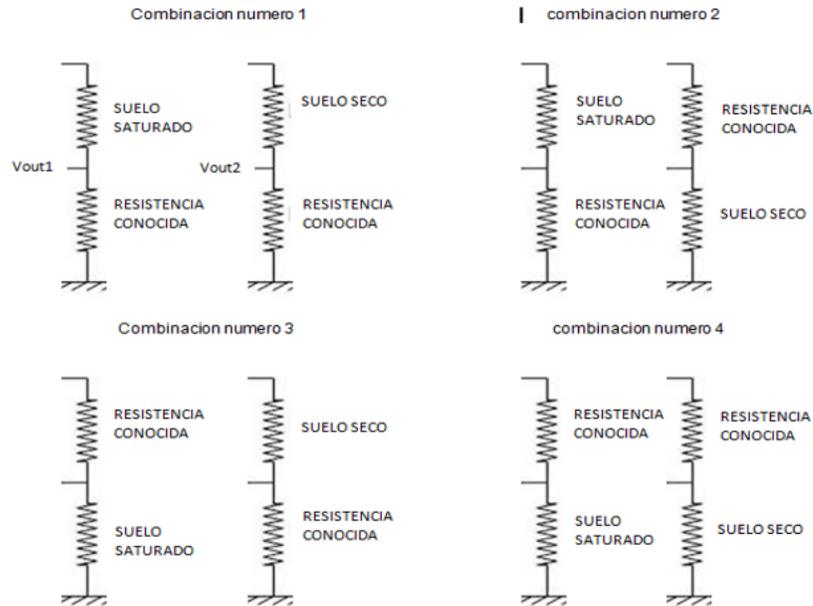


Figura 3.14: Combinaciones posibles de un puente de Wheatstone para encontrar la mejor sensibilidad en el circuito.

la Figura (3.15), consta de dos electrodos con una distancia entre ellos de 2.5 cm, uno de ellos es conectado directamente a tierra, el segundo electrodo se le aplicó un voltaje. Se considera que la probeta de referencia tenía el suelo a capacidad de campo.

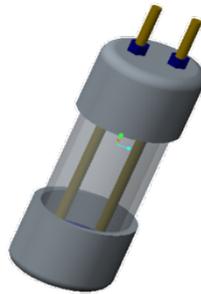


Figura 3.15: Diseño de probeta (Creo Parametric 2.0) para evaluación en laboratorio.

El voltaje aplicado para el sensor fue de 7 volts en corriente alterna (AC), con una frecuencia de 60 Hz, tomando en consideración la AC y la frecuencia encontrada por Calderón (2005).

3.3.2. Acondicionamiento de la señal

La señal alterna fue rectificada empleando la última fase del circuito realizado por Calderón (2005). El acondicionamiento de la señal se realizó para convertir la corriente alterna AC en directa DC y realizar los registros de datos en el acondicionador de señales Logbook/360 de IOTECH. Posteriormente se utilizó un diodo 1N404 y una combinación de resistencias y capacitores electrolíticos (puentes RC), estos tuvieron como objetivos linealizar la señal proveniente de la salida del diodo. Para verificar el circuito se construyó y simuló en el programa PROTEUS Professional V8.0.

3.3.3. Determinación de la humedad del suelo

Como ya se mencionó con anterioridad, para la determinación de humedad se utilizó el puente con mayor sensibilidad con la configuración de puente capacitivo, mismo que se muestra en la Figura (3.16).

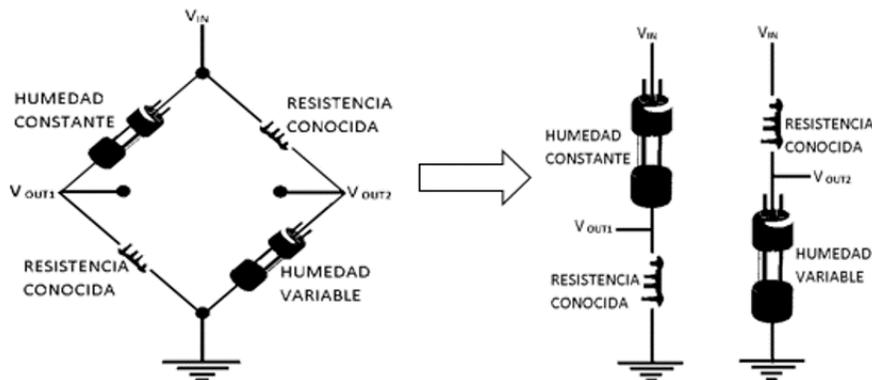


Figura 3.16: Configuración del puente capacitivo para medición de humedad del suelo.

Para estas pruebas se utilizaron dos probetas: una a capacidad de campo (referencia) y la otra para humedades variables en un rango de 3 (secado en estufa) a 40%. La determinación de estas humedades se realizaron utilizando recipientes con 1kg de suelo agregándole la cantidad de agua (ml) requerida, para

la comprobación de la humedad en laboratorio se utilizó el método gravimétrico siguiendo la Ecuación (3.8) para verificar el valor de humedad de las probetas.

$$Humedad = \left(\frac{psh - pss}{pss} \right) \times 100 \quad (3.8)$$

La muestra de suelo se extrajo de la unida experimental “Rancho Navidad” con características de suelo ya descritas con anterioridad. La finalidad de calibración de la humedad con este suelo es para posteriormente generar mapas de diagnóstico de humedad del suelo.

3.3.4. Calibración del sensor de PE

Para la medición de la respuesta del sensor se requirió calibrar el sensor, esto es, para determinar la relación voltaje– porcentaje de humedad. A continuación se describe el proceso de calibración:

Se realizó el registro en el logbook /360 de 7500 datos a una frecuencia de 20 Hz. Con la ayuda de un switch de 8 pasos en un intervalo de 500 datos, se accionó cada uno de los pines que están conectados a la salida de las humedades en seco (estufa) a 10 %, 20 %, 25 %, 30 %, 35 %, 40 % de humedad.

Posteriormente, los datos obtenidos se graficaron en el programa Excel para su verificación de registro y se obtuvieron los promedio de valores encontrados al cambio de humedad en mV. Con los valores de mV Vs porcentaje de humedad, se generó la ecuación de calibración empleando la facilidad de regresión. En el software Minitab V16.

3.4 Sensor para medición de fuerza a la roturación del suelo

3.4.1. Diseño del sensor de RC

La determinación de los parámetros para el diseño y la construcción del octagonal de anillo extendido (OAE) se realizó de acuerdo a Cook and Robinowicz (1963).

Para obtener las dimensiones de los sensores octagonales se utilizó: Software (Turbo Basic), que tiene por nombre “Diseño de Transductores” y que incluye las dimensiones de anillo: radio, ancho y espesor; esfuerzo de cedencia del material (Nm^{-2}), módulo de elasticidad, factor de seguridad y factor de galga, sensibilidad y voltaje de salida esperado, en el cual se involucra todos los factores de diseño y se realiza variando el espesor (t) y el radio (r), de manera que se obtengan las dimensiones específicas de aceros comerciales, ancho (b) y profundidad del anillo (DPT) como se ilustra en la Figura (3.17).

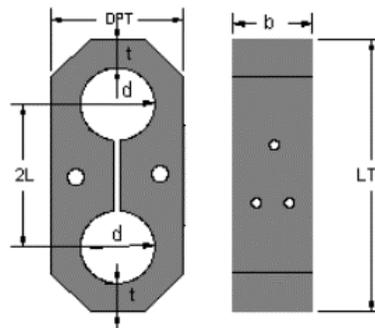


Figura 3.17: Factores de diseño del sensor octagonal extendido.

3.4.2. Montaje de galgas extensiométricas

El tipo de galgas extensiométricas montadas en el anillo del ring fueron de 120 Ohms (Ω) de la empresa KYOWA, empleando el procedimiento de montaje descrito por Sakurai (1996).

La localización de las galgas extensiométricas en el OAE se muestra en la Figura (3.18), donde se puede apreciar una serie de números, que indican cada galga, el puente para la fuerza en la dirección F_x y momento. Esta misma metodología para el acomodo de galgas fue utilizado por Afzalnia and Roberge (2009), en la construcción y calibración de un OAE para la medición de fuerzas en diferentes direcciones.

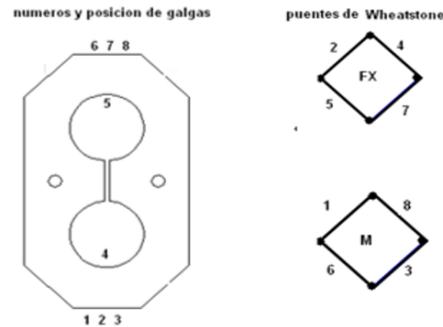


Figura 3.18: Localización de galgas en el octagonal y puentes de Wheatstone para la fuerza en la dirección F_x y MOMENTO.

3.4.3. Adquisición de datos

Para la adquisición de datos, Lackas et al., (1990) diseñaron un sistema portable de adquisición para la medición de requerimientos de energía en suelos, con un sistema de enganche con implementos, en el cual utilizaron un acondicionador de señal analógico-digital DAYTRONIC 1, modelo 10KU, este acondicionador está unido a una computadora laptop a través de su puerto paralelo RS232, y montada al tractor con su sistema de cables conectores.

Para el sistema de adquisición y calibración de sensores transductores de fuerza se utilizó el software Daq View (<http://www.iotech.com>) que trabaja en conjunto con un amplificador-acondicionador DBK-43A que consta de un módulo de 8 canales, un convertidor analógico-digital DakBook/2000. Este módulo se conecta al puerto LAN de la computadora y convierte los valores de voltaje en valores digitales, consta además de 16 canales analógicos y ocho canales digitales, lo que

permite almacenar en forma instantánea los datos, en el disco duro del ordenador y ver la respuesta de los canales en pantalla durante el proceso.

3.4.4. Calibración

Para realizar las pruebas en campo se requirió previamente calibrar el equipo en laboratorio, esto es, determinar la relación voltaje – fuerza para el sensor, esto se realizó para tres diferentes distancias que simulaban la profundidad de trabajo de la herramienta 0.54, 0.64 y 0.74 m.

Se instaló el equipo de sistema de adquisición de datos en laboratorio activando el programa DaqView 9.1.27. Se calibró el acondicionador de señales DBK-43A con los valores mostrados en el Cuadro (3.4) y donde se observa que el voltaje de excitación fue de 5.5 V debido a que las galgas son de 120 Ohms (Ω).

Cuadro 3.4: Ajuste de parámetros en el amplificador DBK-43a para la calibración del sensor RC

Parámetro	Voltaje (V)
Voltaje de excitación	5.5
Input Gain	4.5
Scaling Gain	4.5

Se colocó el sensor de fuerza con una capacidad de 10 KN en un marco de calibración como se muestra en la Figura (3.19). Para la calibración del sensor en laboratorio, se registraron 6 repeticiones para cada una de las distancias que simulaban la profundidad de trabajo de la herramienta.

En el Cuadro (3.5) se muestran los pesos conocidos que se colocaron dentro de la canasta, las corridas se registraron agregando y quitando los pesos en cada repetición. Para la realización de las pruebas se hizo un registro en el Daq-Book/2000 con un total de 6000 datos a una frecuencia de 20 Hz.

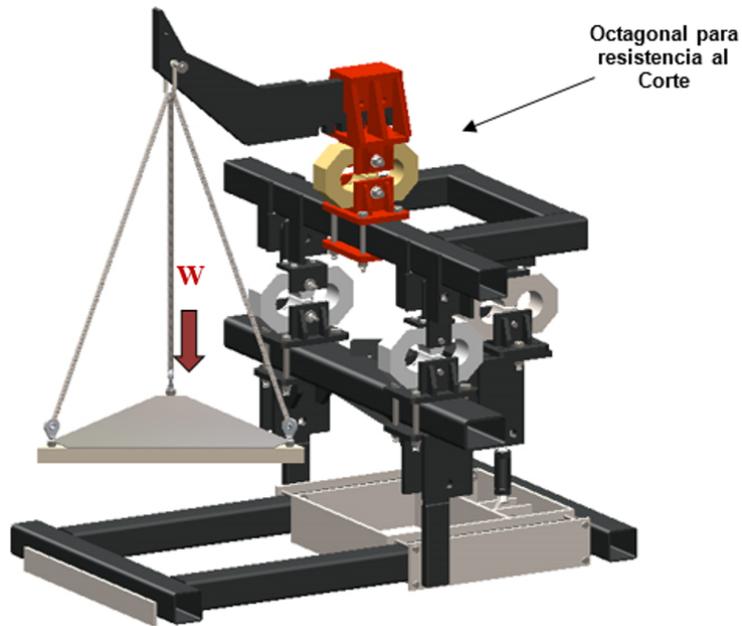


Figura 3.19: Marco de calibración del transductor octagonal

Cuadro 3.5: Tabla de pesos conocidos en la calibración del sensor RC

DATOS	KG	NEWTONS ACUMULADOS
W1	48	470.88
W 2	48	941.76
W 3	48	1412.64
W 4	73	2128.77
W 5	35	2472.12
W 6	35	2815.47
W7	30	3109.77
W8	30	3404.07

Posteriormente, los datos obtenidos se graficaron en el programa Excel para su verificación de registro y se obtuvieron los promedio de valores de deformación en mV. Con los valores de mV Vs N se obtuvo la ecuación de calibración empleando la facilidad de regresión en el software Minitab V16.

los resultados obtenidos fueron analizados estadísticamente bajo un diseño de bloques completamente al azar con una prueba de medias Tukey ($P \geq 0.05$) utilizando el programa estadístico R.

Capítulo 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados del acondicionamiento del carro porta sensores

Se adecuó el marco del equipo MCC 3/5/7 de la empresa TECNOMECA AGRÍCOLA S.A de C.V. como carro-portasensores, incorporándole un sistema con actuador hidráulico para controlar la profundidad de hasta 60cm. El equipo de diagnóstico está integrado por un bastidor acoplado a los tres puntos de levante hidráulico del tractor, donde se colocaron los sensores para el diagnóstico de parámetros físicos del suelo como se muestra en la Figura (4.1): sensor axial del tipo de anillo para medir la resistencia a la penetración (1), sensor de torque para medir la cohesión del suelo (2), sensor octagonal extendido para medir la magnitud de la fuerza requerida para roturación de suelo (3) y sensor de discos lisos para medir la conductividad y capacitancia eléctrica (4).

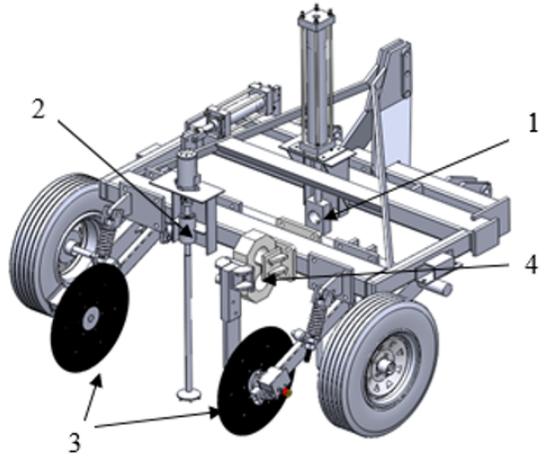


Figura 4.1: Sensores de diagnóstico acoplados al carro porta-sensores.

Los parámetros medidos son transformados a señales eléctricas para posteriormente ser acondicionados y convertidas a señales digitales, así mismo, Georeferenciadas para su registro, análisis y generación de mapas de diagnóstico.

4.2 Desarrollo del penetrómetro

En la Figura (4.2) se muestra la ubicación del penetrómetro desarrollado e integrado por el cono normalizado por ASAE (2002a) sensor de fuerza y profundidad.



Figura 4.2: Penetrómetro integrado por sensor de fuerza, sensor de profundidad y cono.

En la Figura (4.3) se muestran la ubicación del penetrómetro acoplado al

carro-porta sensores, el sensor de fuerza y de profundidad.

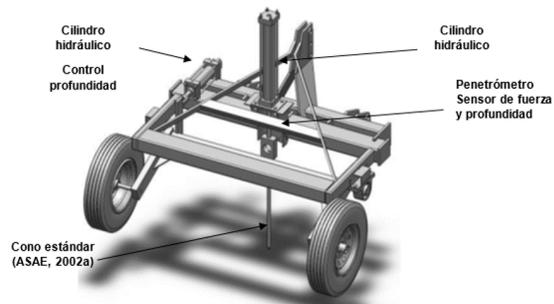


Figura 4.3: Ubicación del penetrómetro en el carro-portasensores.

4.2.1. Resultados del transductor de medición de fuerza de resistencia a la penetración (RP)

El transductor desarrollado de forma conjunta con el cono normalizado por ASAE (2002a) está diseñado para mediciones de hasta 9MPa. Obteniendo una correlación de calibración superior a los 99% lo que indica la precisión de la medición de RP. Con un desplazamiento en campo de 0.80 m a una velocidad de 30mm/s.

Resultados de diseño

En la Figura (4.4) se muestran las características del diseño del ring con una capacidad de 10 KN y un acero AISI 1020 con un último esfuerzo de 380 MPa.

Los cálculos del diseño del transductor se muestran en el apéndice (D), donde se obtuvo un factor de seguridad (FS) de 7.91, resultados similares fueron encontrados por Laffita *et al.*, (2012) en el diseño de un transductor tipo S empleando el análisis numérico por el método de los elementos, con lo cual se garantiza la linealidad durante los registros de carga y descarga del transductor, así como un bajo efecto de histéresis.

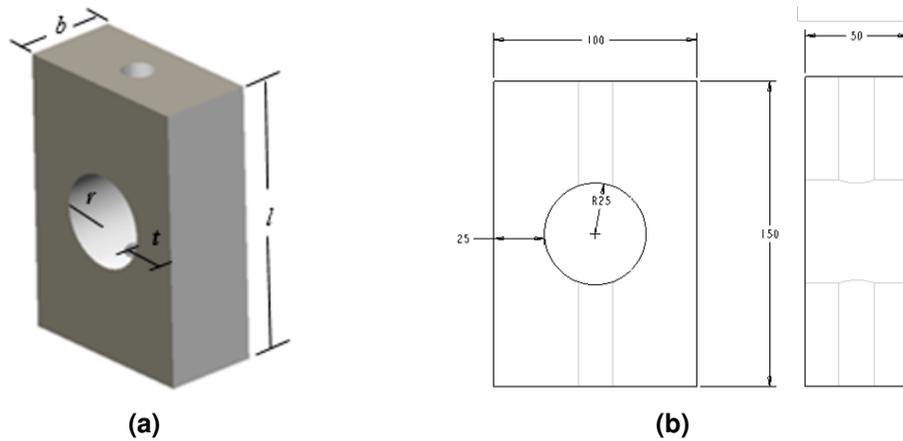


Figura 4.4: Parámetros importantes de diseño en el transductor de anillo y (b) dimensiones finales del transductor diseñado (mm).

Resultado de montaje de galgas extensiométricas

En la Figura (4.5) se muestra el resultado de la colocación y el arreglo de las galgas en un puente de Wheatstone para medir la fuerza de resistencia a la penetración.

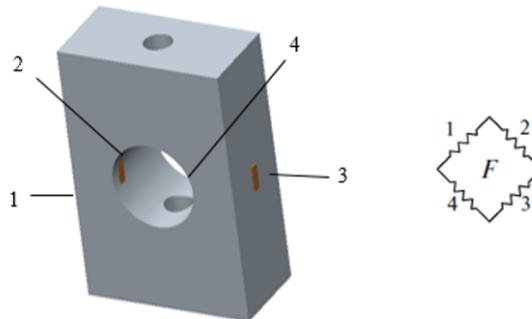


Figura 4.5: Configuración de las galgas extensiométricas para la medición de la fuerza aplicada en el transductor de anillo.

En la Figura (4.6), se muestran las características de las galgas extensiométricas montadas al sensor. El tipo de galgas extensiométricas montadas en el anillo del ring fueron de 350 Ohms (Ω) del tipo KFG-5-350-C1-11 de la marca KYOWA, con un factor de galga de 2.11, en ambas partes fueron colocadas tanto en el interior y exterior del anillo, empleando para su montaje el procedimiento

descrito por Sakurai (1996).

KYOWA		MADE IN JAPAN	
STRAIN GAGES			
TYPE	KFG-5-350-C1-11	GAGE FACTOR (24°C, 50%/RH)	2.11 ± 1.0 %
TEMPERATURE COMPENSATION FOR	STEEL	ADAPTABLE THERMAL EXPANSION	11.7 PPM/°C
GAGE LENGTH	5 mm	TRANSVERSE SENSITIVITY (24°C, 50%/RH)	0.35 %
GAGE RESISTANCE (24°C, 50%/RH)	349.4 ± 0.6 Ω	TEMPERATURE COEFFICIENT OF GAGE FACTOR	- %/°C
LOT No.	Y1963	APPLICABLE GAGE CEMENT	CC-33A, PC-6
		QUANTITY	10

Figura 4.6: Especificaciones de galgas extensiométricas de 350 Ohms (Ω).

Resultados de calibración

En la Figura (4.7) se muestra los materiales utilizados para la calibración del sensor donde se siguió la metodología descrita en el capítulo 3.2.1.4.



Figura 4.7: Materiales utilizados en la calibración del sensor de fuerza

En la Figura (4.8), se muestra un ejemplo de la gráfica de los datos obtenidos en la calibración del sensor de anillo, observando el número de datos para las fuerzas aplicadas en Newton vs la deformación en mV. Se observa la sensibilidad del sensor.

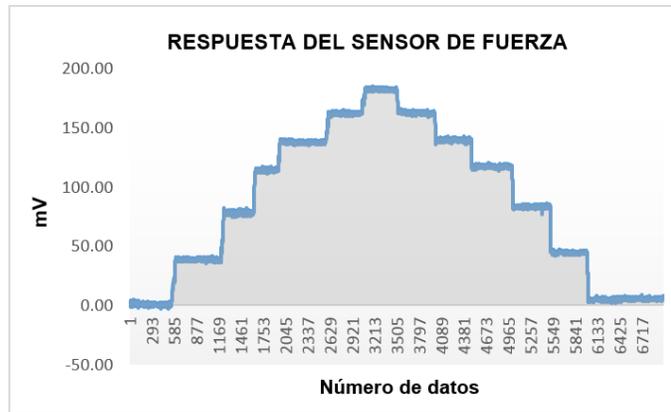


Figura 4.8: Gráfica de calibración del sensor de fuerza

En el Cuadro (4.1) se observan los resultados obtenidos para las repeticiones en las pruebas de calibración del sensor y donde se obtuvieron los siguientes promedios en Newton vs mili volts.

Cuadro 4.1: Resultados de la deformación en mV al momento de realizar la calibración del sensor ring aplicando diferentes pesos.

Pesos(N)	R1	R2	R3	R4	R5	<i>x</i>	<i>σ</i>	<i>δ</i>	<i>C.V.</i>
441.45	34.2	36.9	38.6	37.6	35.7	36.6	1.7	2.8	4.6
882.9	73.6	73.6	75.6	80	71.8	74.9	3.1	9.8	4.1
1324.3	109.9	107.3	112.3	108.7	106.7	109.0	2.2	5.0	2.0
1667.7	133.4	131.1	133.4	131.8	132.4	132.4	1.0	1.0	0.7
2011.5	157.8	154.2	158.3	153.8	153.2	155.4	2.4	5.8	1.5
2305.3	178.1	175.6	175.3	172.8	169.8	174.3	3.1	9.7	1.7

x=promedio, *σ*=varianza, *δ*=desviación estándar, *C.V.*=coeficiente de variación

En la Figura (4.9) se observa la regresión obtenida mediante los datos de calibración bajo condiciones de laboratorio empleando el programa estadístico de Minitab v16. En él se apreció un alto coeficiente de correlación (R-.Sq) de 99.6 % y una ecuación de calibración con sensibilidad de $13,15 NmV^{-1}$ entre las cargas aplicadas (N) y los valores de deformación (mV).

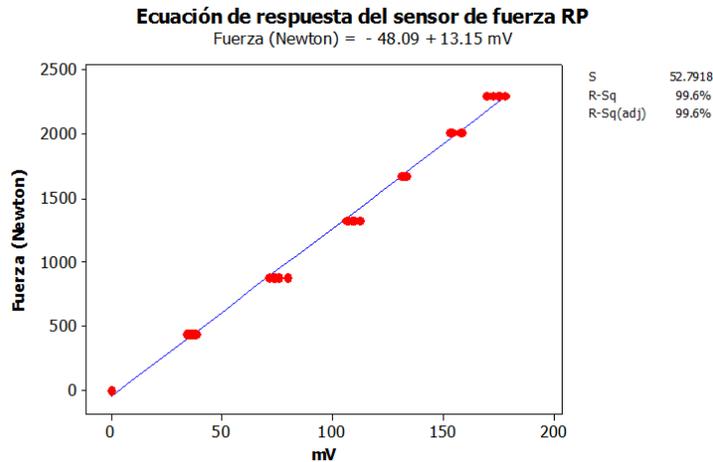


Figura 4.9: Ecuación de respuesta del sensor de fuerza de RP.

Los resultados mostraron que los datos se ajustaron a una ecuación lineal con un $R^2 = 99.6\%$ entre la salida de voltaje y la carga aplicada. Resultados similares fueron reportados por Sun *et al.*, (2006), Laffita *et al.*, (2012) al realizar la calibración de un transductor de fuerza tipo S, aplicando valores de fuerza conocidos.

En el Cuadro (4.2) se muestra el análisis de varianza de la regresión para el sensor de medición de fuerza de resistencia a la penetración. Se observa que estadísticamente es altamente significativo al cambio de fuerza aplicada.

Cuadro 4.2: Análisis de varianza para el sensor de fuerza.

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Regresión	1	35899863	35899863	17225.01	0.000
Error	63	131303	2084		
Total	64	36031166			

GL =Gradoslibertad, SC =Sumacuadrado, CM =CuadradoMedio, F =Factor

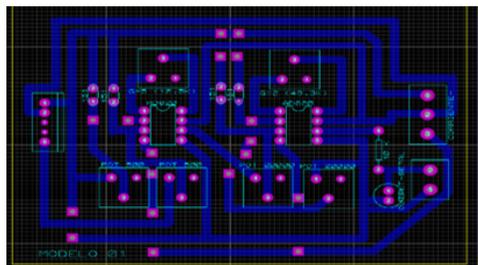
4.2.2. Resultados del sensor de profundidad

La aplicación de este sensor desarrollado fue para realizar mediciones de la profundidad a la que se localizan las capas compactas del suelo. Este sensor

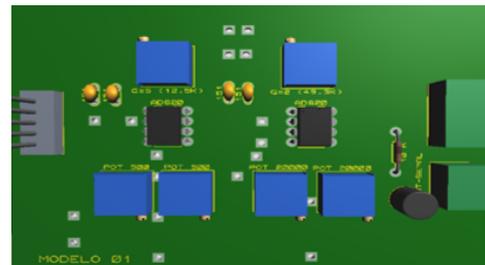
posee unas características como son: un desplazamiento máximo 600mm con una precisión de 10 mm, los datos son enviados de forma directa a un sistema de adquisición de datos para el registro y procesados en el software EXCEL.

Resultados de diseño de un circuito electrónico

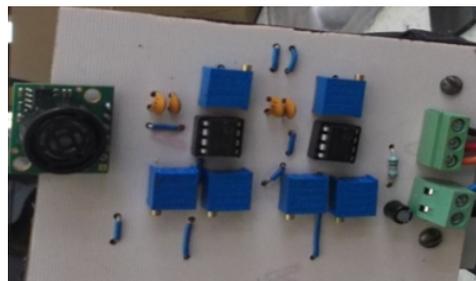
Resultados obtenidos por Salas (2013) al diseñar un circuito electrónico con un amplificador AD620AN demostraron una buena linealidad, con resultados de porcentaje de ruido del 2%. El nuevo diseño de circuito propuesto, tiene una modificación al colocar en serie otro amplificador para reducir el porcentaje de ruido a mediciones menores al 1%. Se realizó el diseño del circuito de profundidad con los componentes: Sonar, amplificadores en serie y filtro pasa bajo, el cual se muestra en la Figura (4.10).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.10: (a) Circuito impreso (b) en 3D y (c) real del sensor de profundidad.

Una vez diseñado el circuito electrónico se colocaron todos los componen-

tes descritos y se procede a realizar la calibración del sensor.

Resultados de calibración

En la Figura (4.11), se muestran los materiales utilizados para la calibración del sensor de profundidad siguiendo la metodología descrita en el capítulo 3.2.2.4.



Figura 4.11: Materiales utilizados en la calibración del sensor de profundidad

En la Figura (4.12), se muestra un ejemplo de la gráfica de los datos obtenidos en la calibración bajo condiciones de laboratorio del sensor de profundidad, observando el número de datos para las distancias aplicadas vs la deformación en mV y la sensibilidad del sensor.

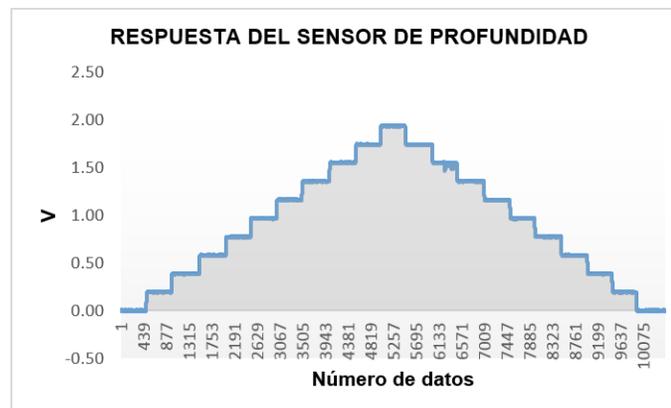


Figura 4.12: Gráfica de calibración del sensor de fuerza

En el Cuadro (4.3) se observan los resultados promedio obtenidos para las repeticiones en las pruebas de calibración del sensor de distancia vs volts.

Cuadro 4.3: Resultados promedio del voltaje del sensor de profundidad aplicando diferentes distancias.

DISTANCIA (mm)	VOLTAJE (V)
0	0.00000
50	0.19508
100	0.38748
150	0.58352
200	0.77876
250	0.96564
300	1.16170
350	1.35788
400	1.55362
450	1.74210
500	1.93270

En la Figura (4.13) se observa la línea de regresión que se obtuvo mediante los datos de calibración, bajo condiciones de laboratorio empleando el programa estadístico de Minitab V16, en él se aprecia un alto coeficiente de correlación (R-Sq) del 100% y obteniendo una ecuación de calibración con sensibilidad de $258,5mmV^{-1}$ entre las distancia aplicadas (mm) y los valores obtenidos en (mV). Esta linealidad de respuesta del sensor, nos da una alta confiabilidad de los datos a obtener para mediciones en un rango de 0 a 500 mm.

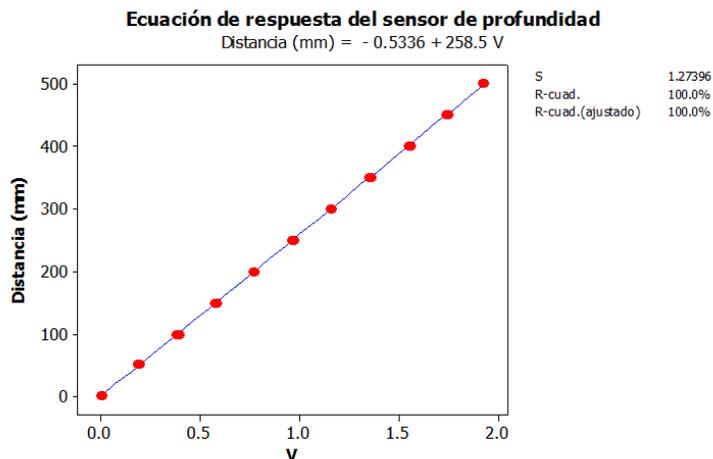


Figura 4.13: Ecuación de respuesta del sensor de profundidad.

Resultados de evaluación del porcentaje de ruido

Las pruebas de los porcentajes de ruido del sensor de profundidad, se realizaron por cada 50mm en un rango de 0 a 600mm. Para los cálculos del porcentaje de ruido de cada señal se utilizó la Ecuación (4.1) con los valores mínimos, máximos y medias.

$$Ruido = \left(\frac{V_{max} - V_{min}}{Media} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

En el Cuadro (4.4) se aprecia el porcentaje de ruido obtenido durante las pruebas a diferentes distancias para la señal del sensor de profundidad. Se observan coeficientes de variación bajos entre las repeticiones para cada distancia, lo que nos indica la confiabilidad de los datos.

Cuadro 4.4: Resultado de porcentaje de ruido para la salida de la señal en el sensor de profundidad.

Distancia (mm)	R1	R2	R3	R4	R5	x	σ	δ	C.V.
0	1.5	1.25	1.13	1.3	1.17	1.27	0.144	0.021	11.4
10	0.81	0.75	1.07	0.67	0.89	0.838	0.1527	0.0233	18.22
20	0.76	0.6	0.6	0.64	0.72	0.664	0.0727	0.0053	10.94
30	0.46	0.43	0.46	0.62	0.46	0.486	0.076	0.0058	15.64
40	0.34	0.37	0.44	0.42	0.46	0.406	0.0498	0.002	12.27
50	0.42	0.43	0.43	0.45	0.42	0.43	0.0122	0.0001	2.85
60	0.41	0.36	0.33	0.33	0.43	0.372	0.046	0.0021	12.38

x =promedio, σ =varianza, δ =desviación estándar, C.V.=coeficiente variación

En la Figura (4.14) se muestra gráficamente la distribución de los datos mostrados en el Cuadro (4.4) donde se observa la disminución del porcentaje de ruido al aumentar la distancia de referencia (0.20m).

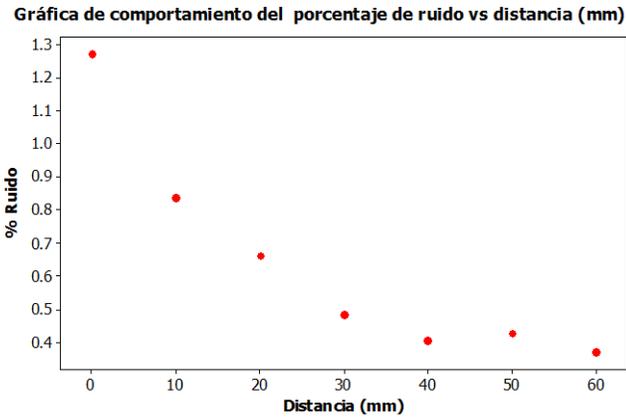
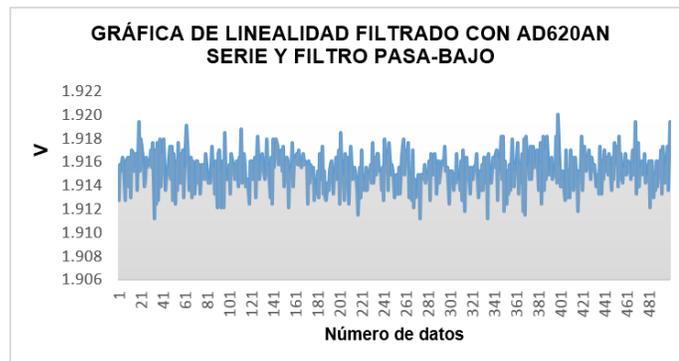
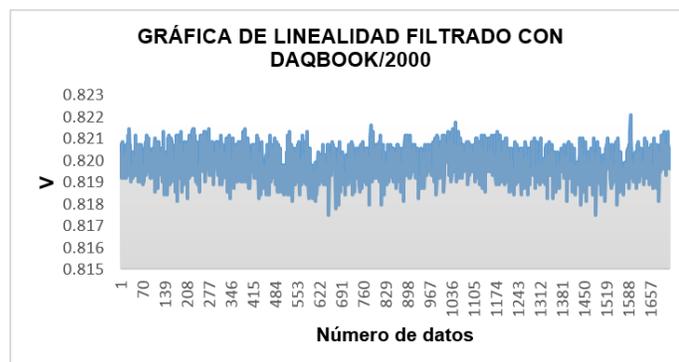


Figura 4.14: Gráfica de comportamiento del porcentaje de ruido vs distancia.

En la Figura (4.15) se muestra la gráfica de linealidad de la salida de la señal con filtrado: a) AD620AN en serie más el filtro pasa-baja y b) utilizando DAQBOOK/2000.



(a)



(b)

Figura 4.15: Gráfica de linealidad de la salida de la señal con filtrado.

Se puede observar una respuesta muy similar en ambas gráficas, tomando en cuenta que el acondicionador de señales Daqbook/2000 cuenta con amplificadores internos y una serie de filtros de instrumentación.

Los resultados de diseño del sensor, incorporando un amplificador de instrumentación AD620AN en serie y filtro pasa-bajo tienen una buena respuesta obteniendo señales con porcentajes de ruido promedio de 0.63 %, comparado con el amplificador DBK43a del DAQBOOK/2000 que muestra señales con valores promedios de porcentaje de ruido de 0.52 %.

4.2.3. Resultados de la evaluación en campo

En la Figura (4.16) se muestra el carro-portal sensores y los componentes del sistema de muestreo de resistencia a la penetración.

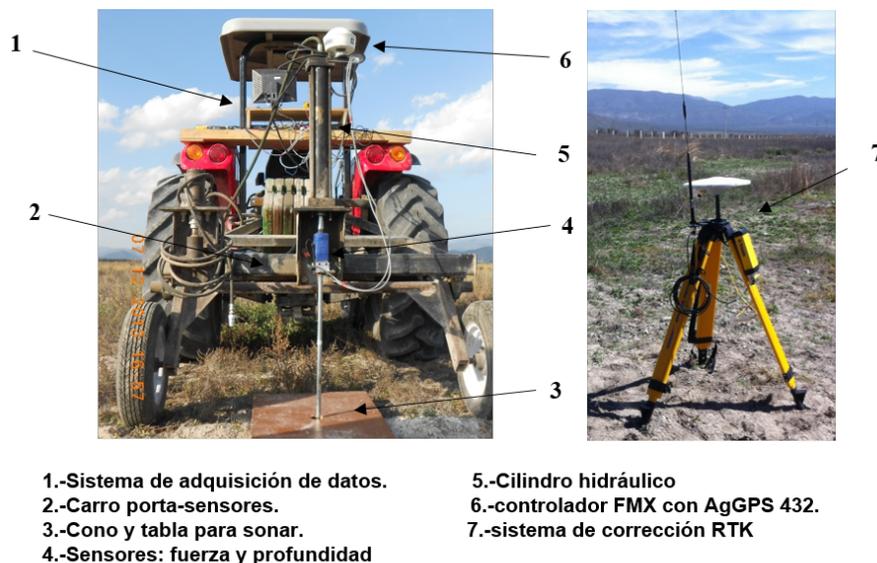
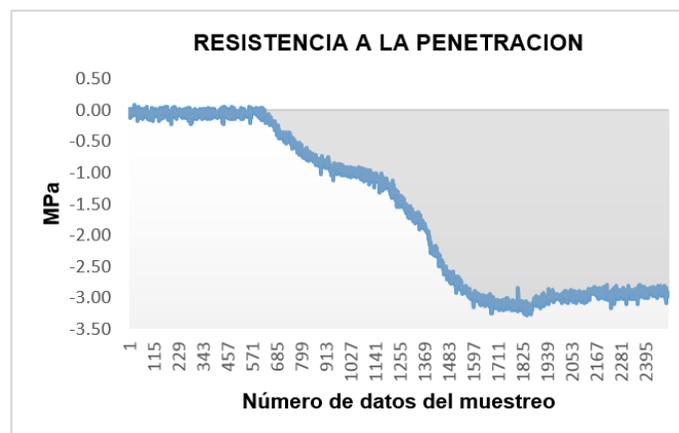


Figura 4.16: Carro porta-sensores acoplado al tractor y partes del sistema de muestreo de resistencia a la penetración.

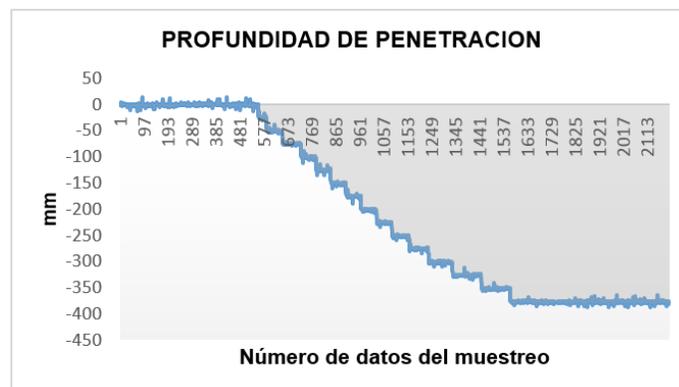
La toma de muestras se hizo en 30 puntos en una superficie de una hectárea. Se realizaron lecturas de (RP) de 0-400 mm de profundidad, mediante la utilización del penetrómetro de punta cónica con 20.27 mm de base y ángulo de 30°

(norma ASAE S313.3, 2002a). Se Introdujo el cono a una velocidad de 30mm.s^{-1} (Norma ASAE EP542, 2002b). También se empleó el equipo de georreferenciación AgGPS-FMX TRIMBLE para la obtención de las coordenadas del muestreo, con precisión menor a 25.4 mm de error utilizando el sistema de corrección RTK (Real Time Kinematic).

En las Figuras (4.17a y 4.17b) se muestran los resultados de las gráficas obtenidas bajo condiciones de campo donde se determina la magnitud de la resistencia a la penetración y su localización (profundidad de penetración). Las unidades de registros de las fuerzas fueron en MPa y la profundidad en mm.



(a)



(b)

Figura 4.17: Resultados de las gráficas obtenidas en campo para a) RP y b) profundidad.

En la sección (a) de las gráficas se aprecia cuando la sonda aún no ha

penetrado el suelo por lo que se encuentra estable. En la sección (b) la sonda ya está penetrando el suelo y manda las señales de la (RP) y profundidad. En la sección (c) las señales del sonar y del penetrómetro se estabilizan, esto debido a dos situaciones; una que el carro-portal sensores se levantó encontrando capas compactadas y la otra que alcanzo las profundidad de 0-400 mm.

En la Figura (4.18) se observa el resultado de la medición de la resistencia a la penetración vs profundidad realizada por el penetrómetro integrado por ambos sensores, lo que muestra una respuesta confiable en la medición de datos obtenidos en campo.

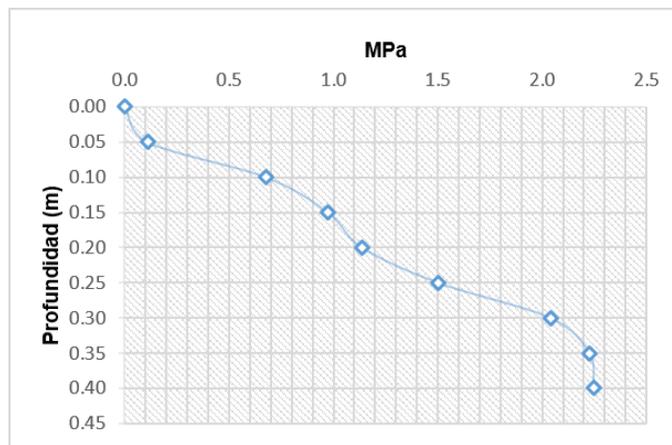


Figura 4.18: Resultados de la resistencia del suelo medida con el penetrómetro (índice de cono) en un punto de medición.

En el Cuadro (4.5) se observan los valores en MPa y la profundidad que se obtuvo para cada punto de muestreo en campo.

Atwell (1993), Taylor y Gardner (1963) encontraron que con RP superiores a 2 MPa se reduce significativamente el crecimiento de las raíces de la mayoría de las especies cultivadas. Lo que significa que requiere identificar esos puntos dentro de un mapa de diagnóstico.

Los resultados obtenidos para cada profundidad se muestran gráficamente en la Figura (2.19) se observa que para los datos obtenidos para las profundidades entre 0.20 y 0.40m. Es donde se encontraron los valores más altos de

Cuadro 4.5: Resultados de campo para la resistencia a la penetración y su profundidad.

Punto muestreado	Posición (coordenadas geográficas)		RP (0.20m)	RP (0.30m)	RP (0.30m)
	longitud	Latitud	MPa	MPa	MPa
1	-100.62065	25.0357506	0.453	1.449	1.449
2	-100.62064	25.0357071	1.132	1.604	2.238
3	-100.620634	25.0356628	0.815	2.658	3.334
4	-100.620623	25.0356165	1.36	2.347	3.304
5	-100.620614	25.0355736	1.394	2.183	3.944
6	-100.620607	25.0355282	0.972	1.802	3.711
7	-100.62158	25.0353744	0.713	1.737	3.361
8	-100.621585	25.0354153	1.128	1.654	2.294
9	-100.621594	25.0354594	1.116	1.81	1.916
10	-100.621605	25.035501	1.235	2.168	4.459
11	-100.621615	25.0355472	1.151	1.859	2.32
12	-100.621626	25.0355911	1.478	1.623	2.48
3	-100.6226	25.0354305	0.964	2.652	3.498
14	-100.62259	25.0353873	1.04	1.798	3.81
15	-100.622584	25.0353426	0.926	2.473	3.036
16	-100.622575	25.0352995	0.503	1.368	2.8
17	-100.622567	25.0352538	0.636	1.097	1.295
18	-100.622558	25.0352148	0.571	2.107	2.37
19	-100.623534	25.0350541	1.017	1.557	2.008
20	-100.623539	25.0350956	1.535	2.816	3.139
21	-100.623548	25.0351407	0.808	1.749	2.442
22	-100.623557	25.0351842	1.132	1.596	1.646
23	-100.623567	25.0352287	0.594	0.72	1.284
24	-100.623577	25.0352722	0.53	1.097	1.577
25	-100.624551	25.0351032	0.831	1.337	1.882
26	-100.624543	25.0350615	0.697	0.785	1.014
27	-100.624535	25.0350151	1.383	1.722	1.875
28	-100.624524	25.0349691	0.762	1.619	2.099
29	-100.624514	25.034927	0.613	1.581	1.821
30	-100.624508	25.0348884	1.856	2.541	2.922

resistencia a la penetración.

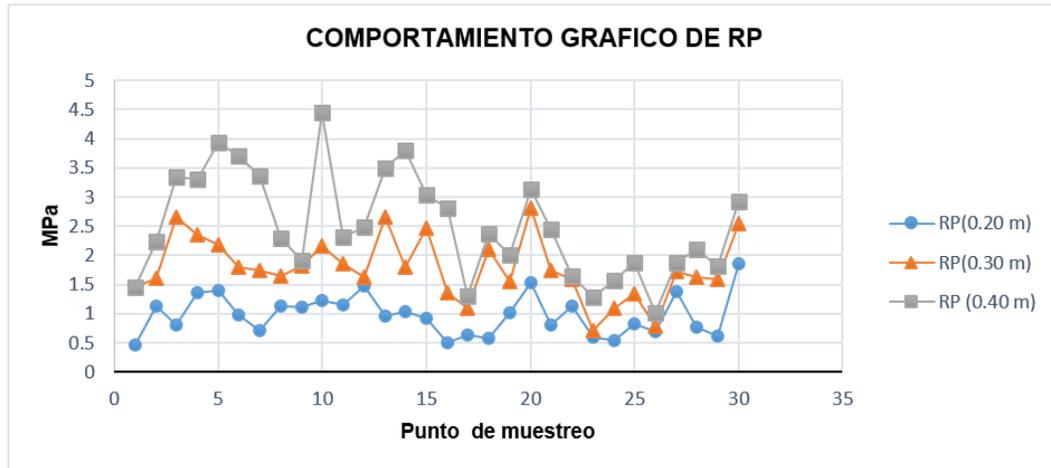


Figura 4.19: Resultados de las gráficas obtenidas en campo para a) RP y b) profundidad.

4.2.4. Resultados de los mapas de diagnóstico de RP

Se generaron mapas para rangos de profundidad de (0.10-0.20), (0.20-0.30) y (0.30-0.40) m. En el software Gs+ V.9, en donde se utilizó la interpolación IDW (Inverse Distance Weighting) por ser uno de los métodos más utilizados y precisos en los estudios de análisis de la variación espacial según Burrough y McDonnell (1998).

En la Figura (4.20) y (4.21) se muestran los mapas para la profundidad de 0.20 m, en la cual se puede observar el rango de valores de 0.644 a 1.656 MPa clasificados por el método de la interpolación interpolación.

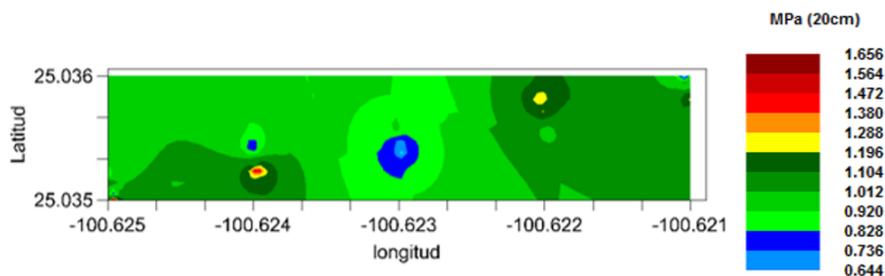


Figura 4.20: Mapa 2D de Resistencia a la penetración para 0.20 m. de profundidad.

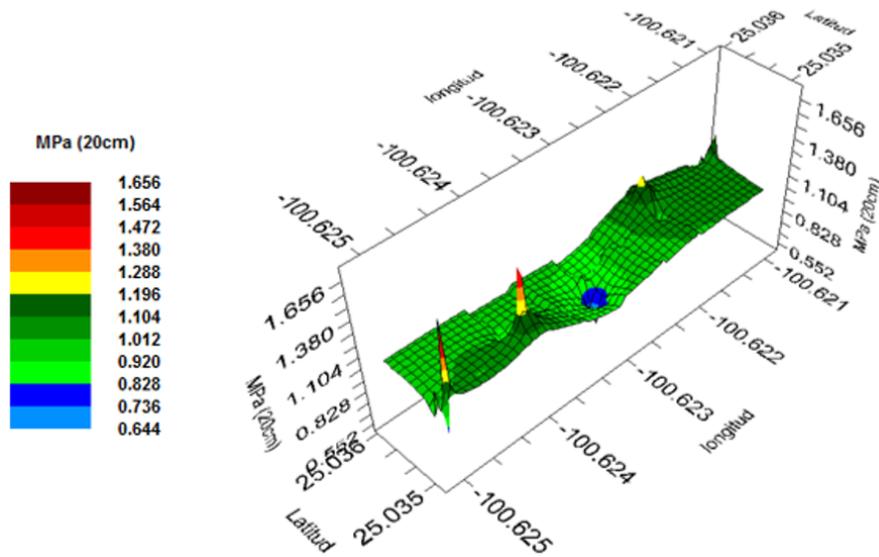


Figura 4.21: Mapa 3D de Resistencia a la penetración para 0.20 m. de profundidad.

Para la profundidad de 0.20 m, se observa que realizando la interpolación se muestra que no existe presencia de capas compactadas superiores a 2 MPa.

En la Figura (4.22) y (4.23) se muestran los mapas para la profundidad de 0.30 m, en la cual se puede observar el rango de valores clasificados por la interpolación de 1.30 a 2.35 MPa.

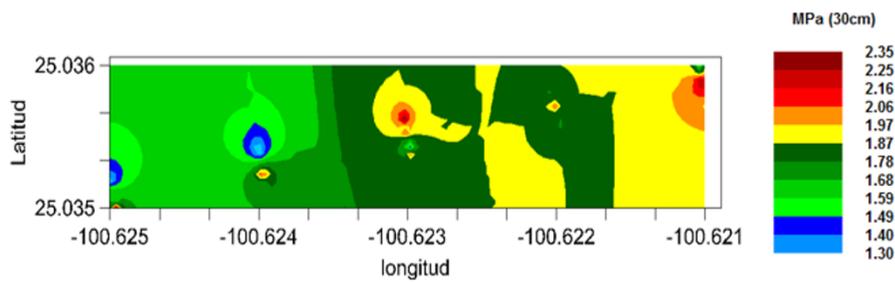


Figura 4.22: Mapa 2D de Resistencia a la penetración para 0.30 m. de profundidad.

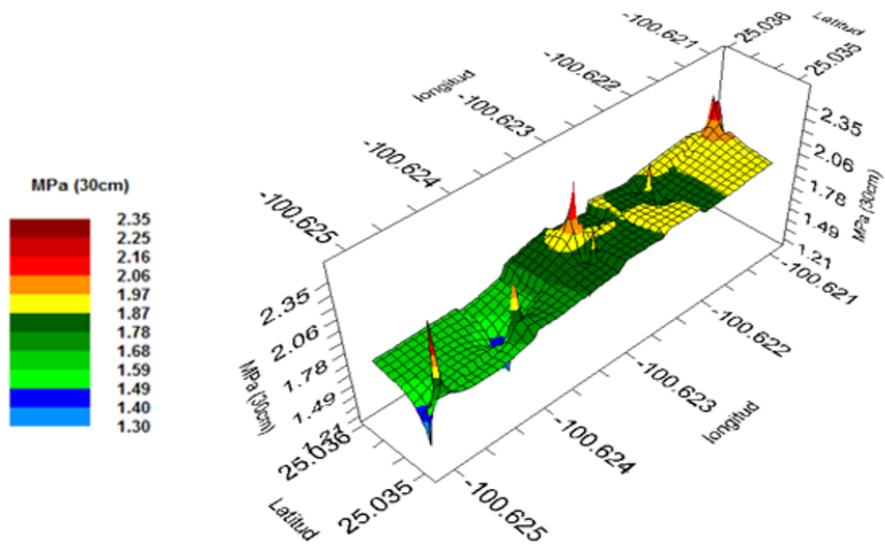


Figura 4.23: Mapa 3D de Resistencia a la penetración para 0.30 m. de profundidad.

Para la profundidad de 0.30 m, se observa que realizando la interpolación existe presencia de capas compactadas superiores al 2 MPa en un 30 % de la superficie muestreada.

En la Figura (4.24) y (4.25) se muestran los mapas para la profundidad de 0.40 m, en la cual se puede observar el rango de valores clasificados por la interpolación de 1.71 a 3.96 MPa.

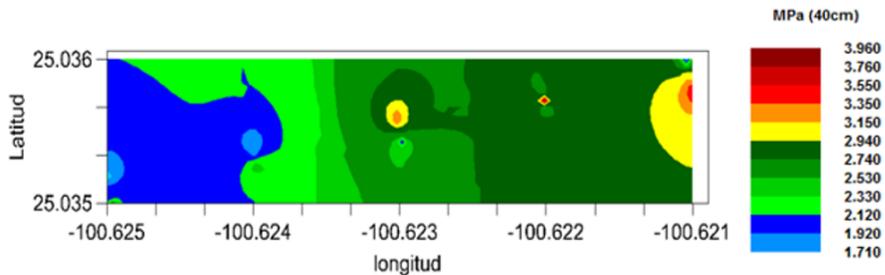


Figura 4.24: Mapa 2D de Resistencia a la penetración para 0.40 m. de profundidad.

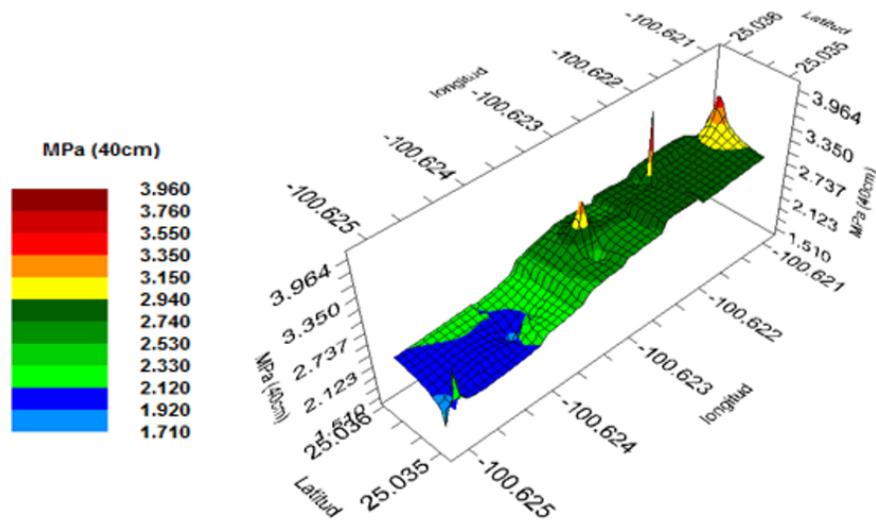


Figura 4.25: Mapa 3D de Resistencia a la penetración para 0.40 m. de profundidad.

Para la profundidad de 0.40 m. se observa que realizando la interpolación se muestra que hay presencia de capas duras superiores al 2 MPa en un 80 % de la superficie muestreada.

Resultados de los mapas a distintas profundidades demostraron que es posible determinar la profundidad requerida de la labranza con RP superiores a 2MPa del suelo con alta precisión con el uso del penetrómetro integrados con GPS-RTK. Resultados similares fueron encontrados por Clark (1999) reportando que la profundidad de la capa dura era completamente variable, desde 10 a 35 cm.

En el Cuadro (4.6) se observan el resultado del análisis del CV para las 3 profundidades graficadas, esta variabilidad se encuentra en un rango del 12 al 60 %, el cual coincide con el criterio descrito por Warrick y Nielsen (1980).

Cuadro 4.6: Resultados del CV para la clasificación de la variabilidad

variable	media	Desviación Estándar	varianza	mín	mediana	máx	C.V.
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=coeficientevariación

4.3 Resultados del desarrollo del sensor para la medición de permisividad eléctrica (PE) del suelo.

En la Figura (4.26) se muestran la ubicación del sensor de (PE) acoplado al carro-porta sensores, se observan los discos cortadores de residuos los cuales fueron utilizados como sonda y permanecían en contacto directo con el suelo, para medir los cambios de humedad y conductividad en forma dinámica.

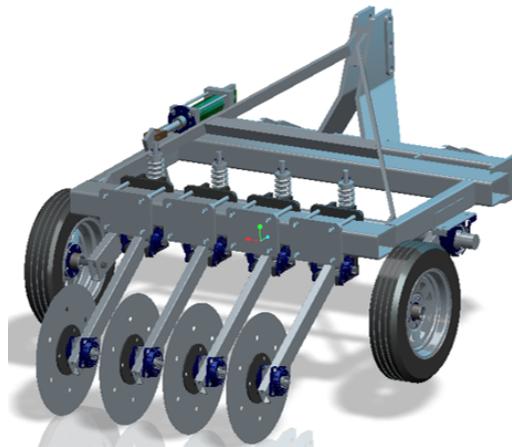


Figura 4.26: Ubicación de los discos (sonda) para medir PE

4.3.1. Resultados del diseño y evaluación de sensibilidad

En la figura (4.27) se muestran los resultados de la combinación elegida, que obtuvo una mayor sensibilidad encontrada a partir de las metodologías descritas en el capítulo 3.3.1. Es de suma importancia colocar varias humedades

intermedias para generar la ecuación de respuesta que determine el mayor rango de voltaje.

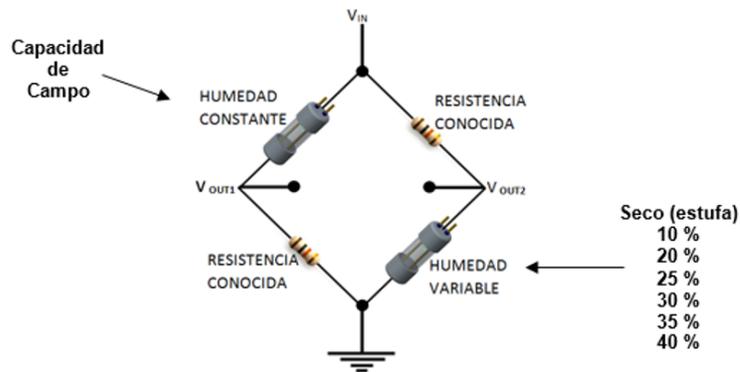


Figura 4.27: Combinación elegida para realización del sensor de permisividad.

En el Cuadro (4.7) se muestran los resultados de la prueba para corriente alterna (AC) que va directamente en el sensor y corriente directa (DC) que es la que se utilizara para la linealización de la señal. Utilizando distintas resistencias ya conocidas

Cuadro 4.7: Resultados de la prueba de la sensibilidad para AC y DC.

Ω	corriente alterna (AC)				corriente directa (DC)		
	V_{in}	V_{out1}	V_{out2}	sens.	V_{out1}	V_{out2}	sens.
5K	7.12	6.98	2.59	4.369	2.93	0.999	1.931
10K	7.12	7.06	1.599	5.43	2.99	0.571	2.419
20K	7.12	7.09	0.904	6.16	3.02	0.272	2.748
30K	7.12	7.08	0.632	6.44	3.01	0.1648	2.8452
40K	7.12	7.09	0.480	6.59	3.02	0.1083	2.9117
50K	7.12	7.1	0.393	6.67	2.99	0.0763	2.9137

En el ANEXO (E), se muestran los resultados complementarios de las combinaciones 1, 3, y 4 descritas en la metodología 3.3.1.

4.3.2. Resultados del acondicionamiento y simulación de la señal

Para el acondicionamiento de la señal se utilizó la última parte del circuito realizado por Calderón (2005), que consta de la combinación de tres resistencias y tres capacitores. Se realizó el diseño del circuito de linealización en el software PROTEUS V.8 profesional (ISIS) para las pruebas de simulación, con la ayuda de un osciloscopio virtual como se muestra en la Figura (4.28).

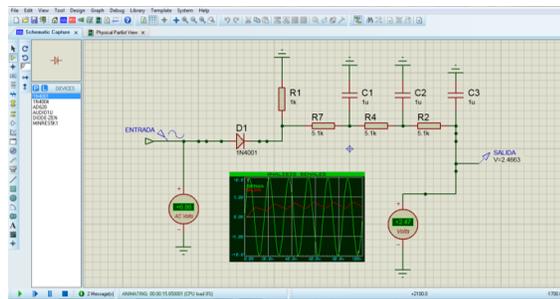


Figura 4.28: Diseño del circuito de linealización de señal para simulación.

En la Figura (4.29) se muestra los resultados obtenidos de la simulación del circuito donde se puede observar la linealización de la señal de AC a DC.

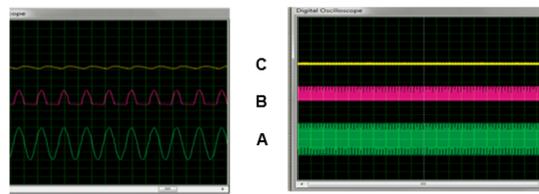
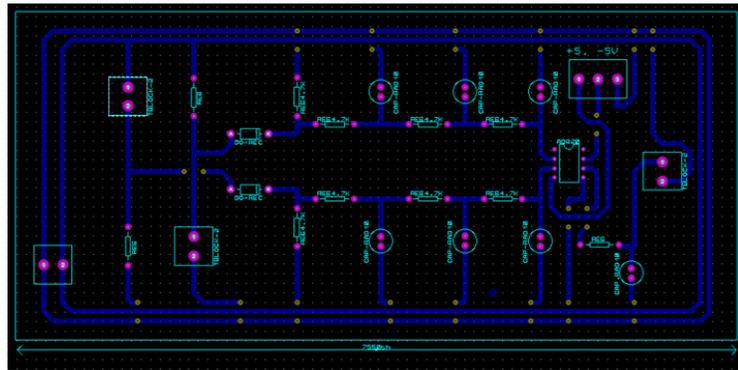


Figura 4.29: Resultado de la simulación de circuito de linealización.

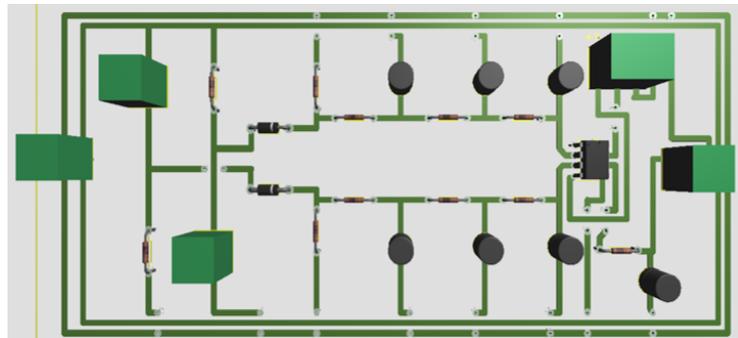
En la imagen mostrada del osciloscopio: A) representa la salida del sensor con corriente alterna (AC), B) salida del diodo (media onda) y C) representa la salida de la combinación de resistencias y capacitores, donde se observa que es completamente lineal.

Terminada la simulación y verificación del funcionamiento se construyó el circuito electrónico del sensor de permisividad eléctrica (PE), el cual se muestran

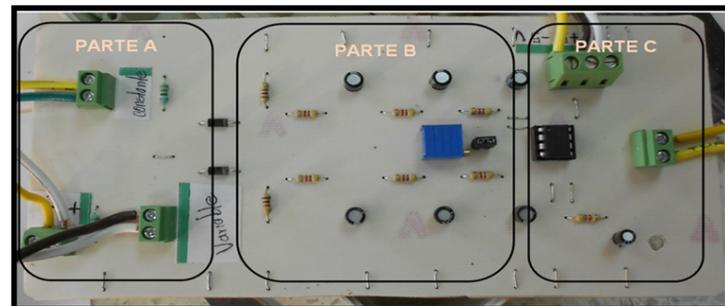
en la Figura (4.30) estos fueron elaborados en PROTEUS V.8 profesional (ARES).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.30: Desarrollo del circuito del sensor de PE a) esquemático, b) 3D y c) real.

El la Figura (4.30c) circuito real se observa las tres partes de las que está compuesto el circuito. La parte A es el sensor, la parte B se encuentra compuesto por la combinación RC que hace la linealización AC a DC y la parte C del circuito se encuentra en el amplificador AD620 en conexión como diferencial y conectado a

un filtro pasa-baja. La señal de salida va directamente al sistema de adquisición de datos DAQBOOK/2000.

4.3.3. Resultados de calibración del sensor de permisividad eléctrica

En la Figura (4.31) se muestra los materiales utilizados para la calibración del sensor.

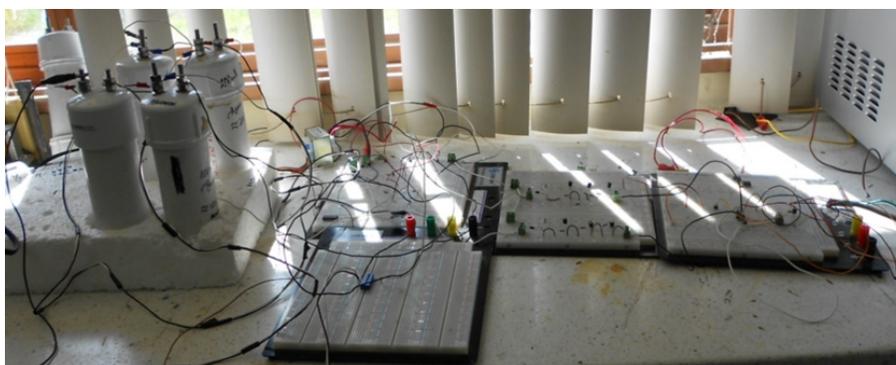


Figura 4.31: Materiales utilizados en la calibración del sensor de permisividad eléctrica

En el Cuadro (4.8) se muestran las humedades utilizadas para la calibración del sensor de conductividad eléctrica y las humedades obtenida en laboratorio.

Cuadro 4.8: Tabla de humedades conocidas para aplicar en la calibración de sensor.

Datos	ml/Kg	% humedad considerada	% humedad gravimétrico
W1	seco	0	7.38
W2	100	10	18.01
W3	200	20	27.17
W4	250	25	31
W5	300	30	38.67
W6	350	35	44.54
W7	400	40	47.2

En la Figura (4.32) se muestra un ejemplo de la gráfica de los datos obtenidos en la calibración bajo condiciones de laboratorio del sensor de (PE), obser-

vando el número de datos para los porcentajes de humedad aplicados vs capacidad en mV. Se observa la sensibilidad del sensor.

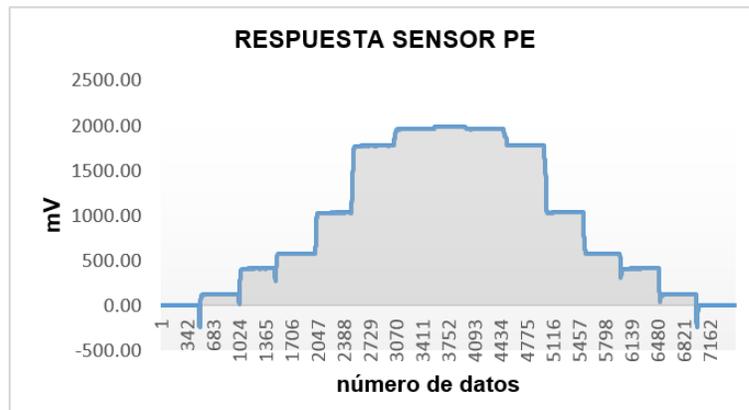


Figura 4.32: Gráfica de calibración del sensor de P.E.

En el Cuadro (4.9) se observan los resultados obtenidos para las repeticiones en las pruebas de calibración del sensor y se obtuvieron los siguientes promedios en distancia Vs volts.

Cuadro 4.9: Resultados del voltaje del sensor de profundidad aplicando distintas humedades conocidas.

% humedad	R1(mV)	R2 (mV)	R3 (mV)
7.38	0	0	0
18.01	124.5	123.3	122.3
27.17	412.9	412.7	412.9
31	579.9	576.7	578.6
38.67	1034.9	1031.7	1034.5
44.54	1778.9	1777.7	1786.8
47.2	1968.9	1957.7	1965.6

En la Figura (4.33) se observa la línea de regresión cuadrática que se obtuvo mediante los datos de calibración, empleando el programa estadístico de Minitab 16, en él se aprecia un alto coeficiente de correlación (R-.Sq) de 97.5%, obteniendo una ecuación de $humedad = 10,58 + 0,04105mV - 0,000012mV^2$, entre las humedades aplicadas (%) y los valores obtenidos en (mili Volts). Esta ecuación cuadrática proporciona una alta confiabilidad en la respuesta del sensor.

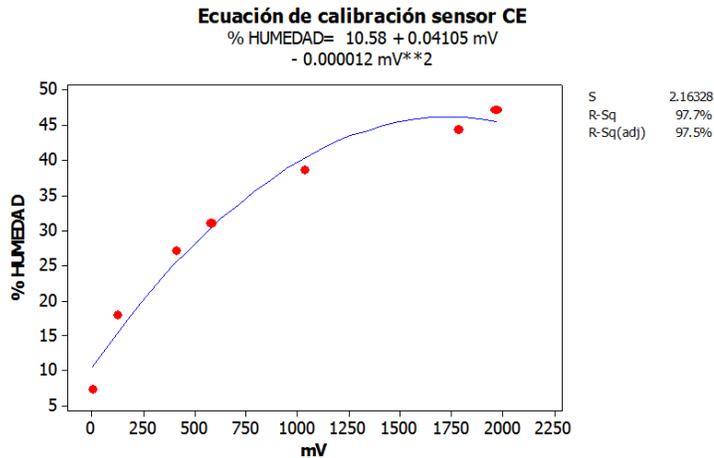


Figura 4.33: Ecuación cuadrática de calibración del sensor de P.E.

Resultados similares fueron reportados por Sun *et al.*, (2006), obteniendo una ecuación cuadrática con , al desarrollar un sensor de capacitancia para el monitoreo dinámico de la humedad del suelo aplicado en agricultura de precisión.

Con el propósito de hacer más eficiente el valor de α para convertir la ecuación cuadrática en lineal se utilizó la transformación logarítmica mostrada en la Ecuación (4.2) obteniendo el logaritmo natural (ln) de los valores de registro en (mV) y conservando los valores de Y (% humedad).

$$Y = \alpha + \beta \ln X \tag{4.2}$$

En el Cuadro (4.10) se muestran los datos obtenidos al aplicar el (ln) de los valores en mV, que fueron utilizados para obtener la ecuación lineal.

Cuadro 4.10: Valores obtenidos durante la transformación

% humedad	R1	R2	R3
	Ln(mv)	Ln(mV)	Ln(mV)
18.01	4.824	4.815	4.806
27.17	6.023	6.023	6.023
31	6.363	6.357	6.361
38.67	6.942	6.939	6.942
44.54	7.484	7.483	7.488
47.2	7.585	7.58	7.584

En la Figura (4.34) se observa la línea de regresión lineal que se obtuvo al realizar la transformación logarítmica, empleando el programa estadístico Minitab 16, en él se aprecia un coeficiente de correlación (R-Sq) de 98 % obteniendo la ecuación de calibración de $humedad = -34,65 + 10,57ln(mV)$ entre las humedades aplicadas (%) y los valores obtenidos en (mili Volts).

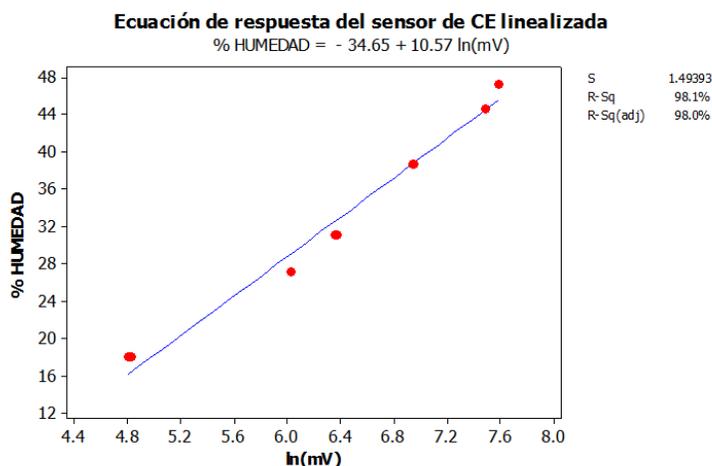


Figura 4.34: Grafica obtenida para la generación de ecuación lineal de calibración del sensor.

4.3.4. Comparación de resultados de determinación de humedad con método gravimétrico y sensor de (PE).

En el Cuadro (4.11) se muestran los resultados obtenidos de la comparación en la medición de humedad real (gravimétricos) y medición por el sensor diseñado; para ambos casos de ecuaciones de respuesta (cuadrático y lineal).

Cuadro 4.11: Valores obtenidos para la medición de humedad del suelo con los sensores.

Medición Método gravimétrico	Medición con Sensor PE					
	ecuación cuadrática			ecuación lineal		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
18.01	15.5	15.46	15.42	16.34	16.24	16.15
27.17	25.48	25.48	25.48	29.02	29.01	29.02
31	30.35	30.26	30.31	32.61	32.55	32.58
38.67	40.21	40.16	40.2	38.73	38.69	38.72
44.54	45.63	45.63	45.62	44.45	44.45	44.5
47.2	44.88	44.95	44.9	45.53	45.47	45.51

En la Figura (4.35) se muestra la gráfica de comparación entre la humedad medida gravimétricamente y con el sensor que tiene un gran paralelismo para las 3 repeticiones realizadas.

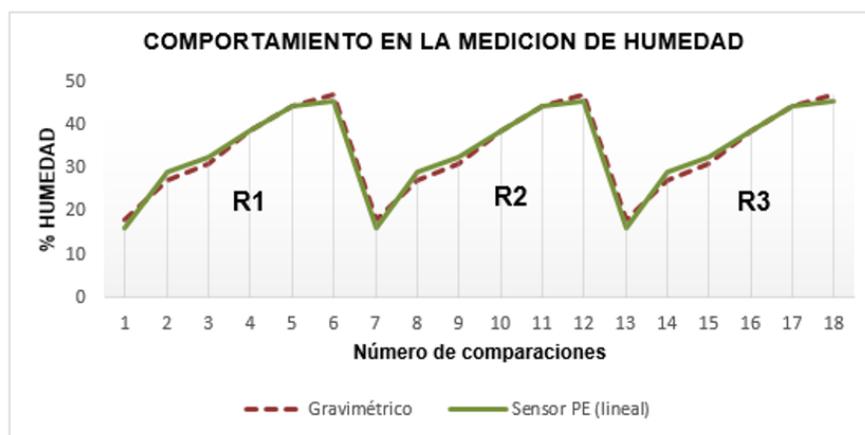
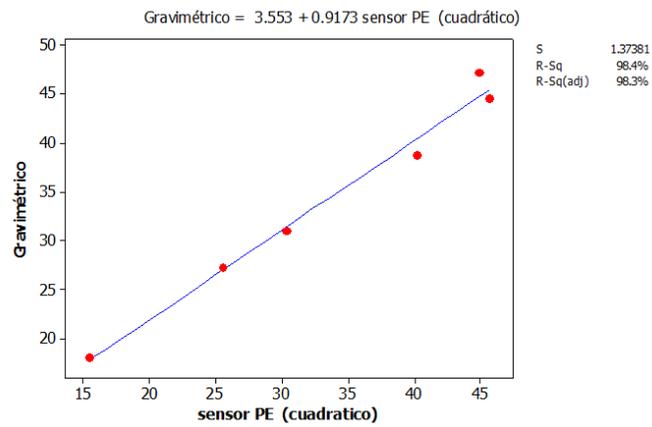
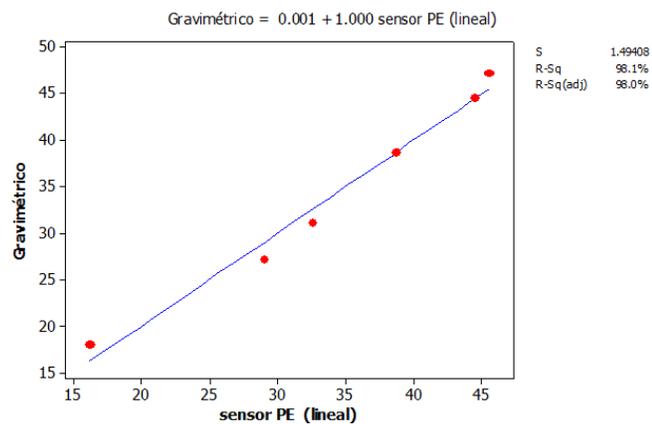


Figura 4.35: Comportamiento de la humedad gravimétrica y sensor PE durante la calibración.

En la Figura (4.36) se observa la correspondencia entre los dos métodos utilizados para la medición de humedad. El análisis de regresión muestra un R^2 mayor al 90 %.



(a)



(b)

Figura 4.36: Comparación entre los valores de humedad gravimétricos y a) sensor PE cuadrático b) sensor PE lineal.

Trabajos previos de validación de diferentes tipos de sondas encontrados por: Sun *et al.*, (2006); Topp y Davis, (1985); y Nadler *et al.*, (1991); obtuvieron valores de correlación similares a los encontrados.

4.4 Resultados del sensor para medición de fuerza de resistencia al corte (RC) del suelo

En la Figura (4.37) se muestra el sensor OAE desarrollado con sus conexiones para la fuerza en la dirección FX y MOMENTO.



Figura 4.37: Sensor desarrollado OAE.

4.4.1. Resultado de Diseño

En la Figura (4.39) se muestran las características del diseño del octagonal de anillo extendido (OAE) con una capacidad de 10 KN y un esfuerzo máximo del acero 4140 de 900- 1050 MPa.

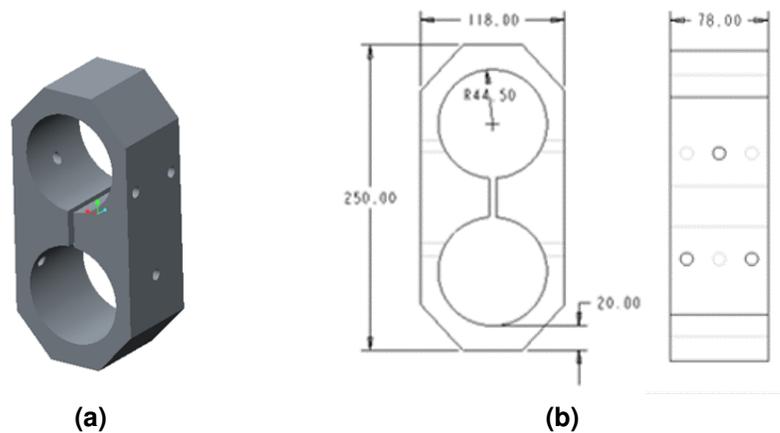


Figura 4.38: (a) Diseño CREO 2.0 y (b) dimensiones finales del transductor en (mm).

4.4.2. Resultado del montaje de galgas extensiométricas

En la Figura (4.40) se muestra el montaje de las galgas, así como la configuración del puente de Wheatstone para FX y Momento. En el apéndice (F) se muestra la descripción completa del montaje de galgas.

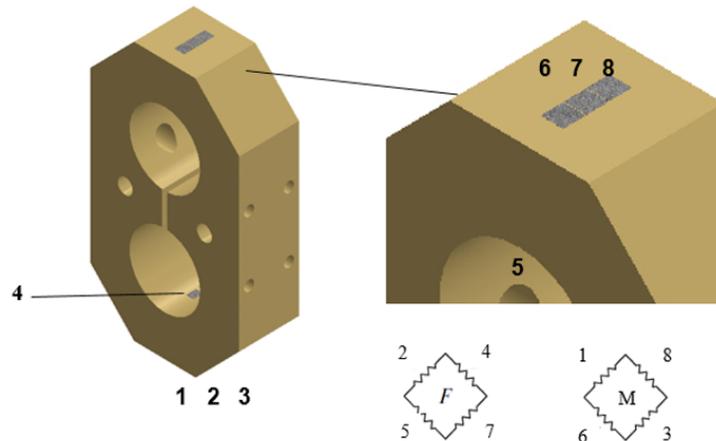


Figura 4.39: Montaje de galgas y sus puentes de Wheatstone.

En la Figura (4.41) se muestran las características de las galgas extensiométricas montadas al sensor. El tipo de galgas extensiométricas montadas en el anillo del ring fueron de 120Ω del tipo KFG-3-120-D16-11N30C2 de la marca Kyowa, Con un factor de galga de 2.11, en ambas partes fueron colocadas tanto en el interior y exterior del anillo, empleando el procedimiento para su montaje el descrito por Sakurai (1996).

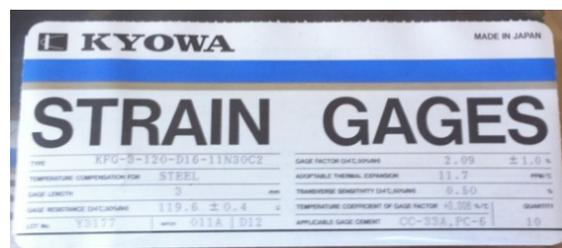


Figura 4.40: Especificaciones de galgas extensiométricas de 120Ω empleadas en el octagonal de anillo extendido.

4.4.3. Resultados de calibración

En la Figura (4.42) se muestra los materiales utilizados para la calibración de sensor, donde se siguió la metodología descrita en 3.4.4, utilizando 3 brazos de palanca.



Figura 4.41: Materiales utilizados en la calibración del sensor OAE.

Resultados de calibración para fuerza (F_x)

En la Figura (4.43) se muestra un ejemplo de la gráfica de los datos obtenidos en la calibración bajo condiciones de laboratorio del OAE para la distancia de fuerza aplicada de 0.54, 0.64 y 0.74 m.

En el cuadro (4.12), (4.13) y (4.14) se observan los resultados obtenidos de F_x en las 3 posiciones 0.54, 0.64 y 0.74 m, respectivamente. Para las 6 repeticiones se obtuvieron los siguientes valores en mV.

En la Figura (4.44) se observa la línea de regresión que se obtuvo mediante los datos de calibración empleando el programa estadístico Minitab 16, en él se aprecia para la F_x un coeficiente de correlación (R^2) del 98.7% entre las cargas aplicadas (N) y los valores de deformación obtenidos en (mV), obteniendo una sensibilidad de $5,343 NmV^{-1}$.

Cuadro 4.12: Resultados de las repeticiones de las pruebas de calibración de fuerzas del OAE para la FX aplicando los pesos en 0.54m.

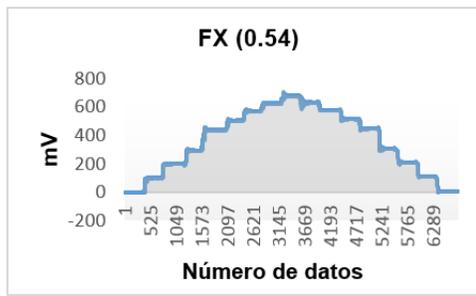
NEWTONS	R1	R2	R3	R4	R5	R6	PROMEDIO
0	0	0	0	0	0	0	0
470.9	99.9	98.5	100.1	100.3	100.2	100.3	99.9
941.8	197.9	197.5	197.6	197.9	198.3	198.4	197.9
1412.6	293.2	288.9	292.2	292.6	293.01	293.2	292.2
2128.8	436.5	433.6	432.9	433.6	434.1	434.3	434.2
2472.1	503.3	501.8	500.9	501.7	501.7	502.2	501.9
2815.5	570.6	566.1	566.7	567.3	567.4	567.2	567.6
3109.8	625.0	621.3	621.8	621.3	621.4	621.3	622.0
3404.1	678.5	675.0	677.7	675.5	675.1	675.2	676.2

Cuadro 4.13: Resultados de las repeticiones de las pruebas de calibración de fuerzas del OAE para la FX aplicando los pesos en 0.64m.

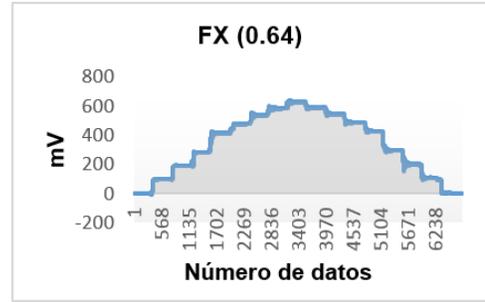
NEWTONS	R1	R2	R3	R4	R5	R6	PROMEDIO
0	0	0	0	0	0	0	0
470.9	96.1	96.8	97.1	94.9	97.4	97.8	96.7
941.8	189.9	190.5	191.2	189	191.7	192.3	190.8
1412.6	280.9	281.4	282.1	279.8	282.2	279.8	281
2128.8	415.1	414.1	414.7	412.2	415.5	413.6	414.2
2472.1	477.9	476.8	476.8	474.5	477.4	469	475.4
2815.5	538.5	537	537.1	534.3	537.5	537.5	537
3109.8	587.1	585.4	585.1	582.4	585.6	586	585.3
3404.1	631.5	628.6	628.7	625.5	629.2	629.3	628.8

Cuadro 4.14: Resultados de las repeticiones de las pruebas de calibración de fuerzas del OAE para la FX aplicando los pesos en 0.74m.

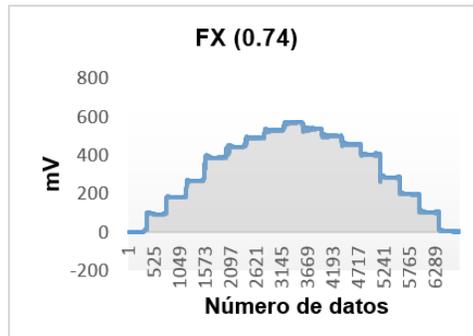
NEWTONS	R1	R2	R3	R4	R5	R6	PROMEDIO
0	0	0	0	0	0	0	0
470.9	87.5	91.2	92.7	93.8	94.7	93.2	92.2
941.8	177	179.7	181.8	182.7	182.7	182.9	181.1
1412.6	266.9	263.8	266.3	267.1	267.8	268.4	266.7
2128.8	397.9	392.4	391.5	387.5	389.3	388.8	391.3
2472.1	459	446	447.3	443.9	444.6	444.5	447.6
2815.5	514.1	493.6	493.4	490.7	491.3	492.1	495.9
3109.8	560.4	530.3	533.7	530.4	530.7	532	536.3
3404.1	605.2	571.6	573.5	571.1	571	572.6	577.5



(a)



(b)



(c)

Figura 4.42: (a) Gráfica de calibración del sensor para la FX en 3 posiciones a) 0.54, b) 0.64 y c) 0.74 m.

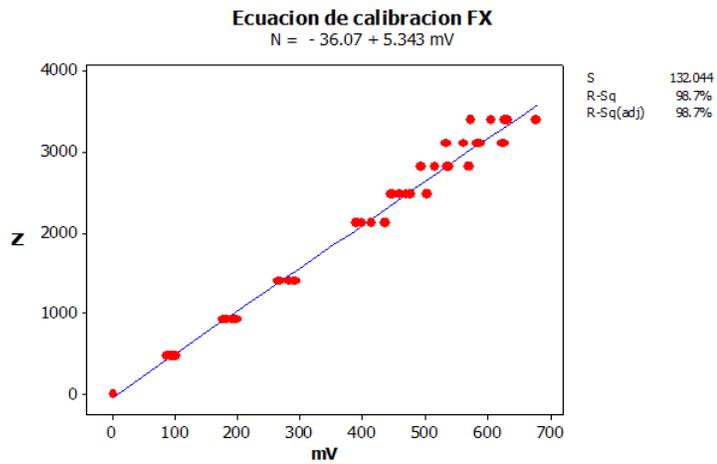


Figura 4.43: Ecuación de calibración para FX del sensor.

Resultados de calibración para el momento.

En la Figura (4.45) se muestra un ejemplo de la gráfica de los datos obtenidos en la calibración bajo condiciones de laboratorio del OAE para las 3 posiciones simuladas en laboratorio.

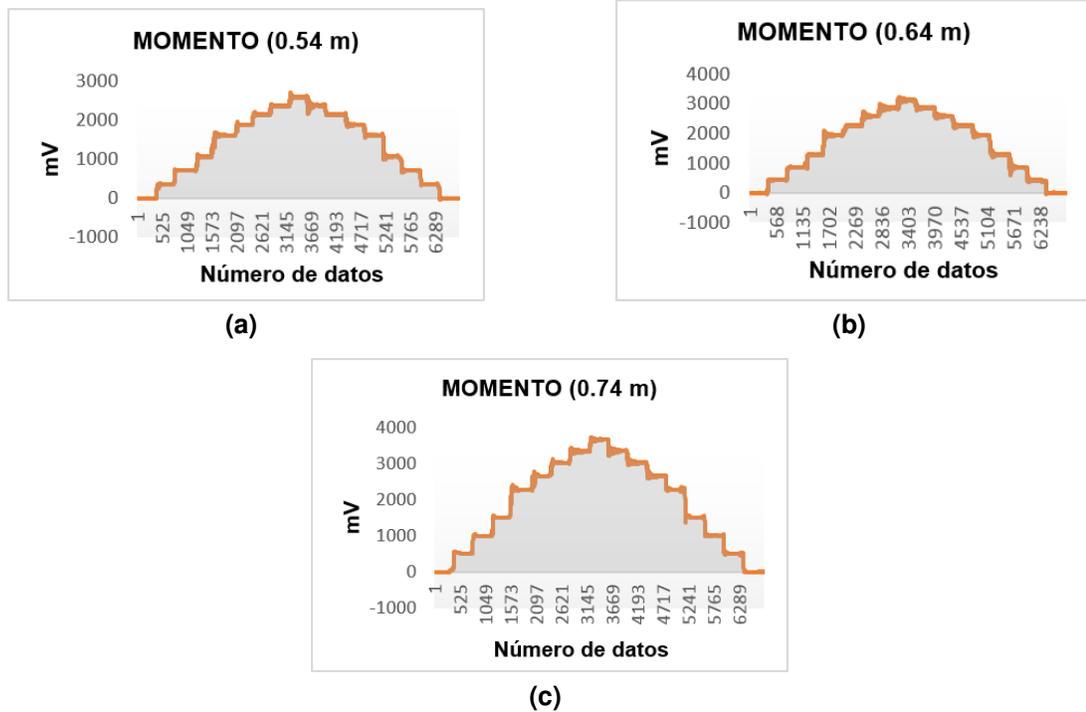


Figura 4.44: (Gráfica de respuesta de calibración del sensor para MOMENTO en 3 posiciones a)0.54, b)0.64 y c)0.74 m.

En el Cuadro (4.15), (4.16) y (4.17) se observan los resultados obtenidos para el momento de la fuerza en las 3 posiciones 0.54, 0.64 y 0.74 m, respectivamente. Para las 6 repeticiones se obtuvieron los siguientes valores en mV.

En la Figura (4.46) se observa la línea de regresión que se obtuvo mediante los datos de calibración, empleando el programa estadístico Minitab 16, en él se aprecia lo siguiente:

1. Un coeficiente de correlación (R^2) del 100% entre los momentos de la fuerza aplicados (N.m) y los valores de deformación obtenidos en (mV),

Cuadro 4.15: Resultados de las repeticiones de las pruebas de calibración del OAE para el momento a 0.54m.

N.m	R1	R2	R3	R4	R5	R6	PROMEDIO
0	0	0	0	0	0	0	0
254.27	354.5	348.4	354.2	354.8	356	355.2	353.8
508.55	713.5	712.5	711.7	713.6	714.3	713.5	713.2
762.82	1066.5	1056.3	1066.8	1070.8	1070.2	1070.4	1066.8
1149.53	1613.1	1616	1614.3	1612.1	1612.5	1614.2	1613.7
1334.94	1876.1	1884.4	1881.8	1881.5	1881.7	1879.3	1880.8
1520.35	2146.9	2145.1	2147.9	2146.3	2147.5	2144.2	2146.3
1679.27	2370.9	2376.3	2371.5	2371.4	2371.2	2369.7	2371.8
1838.19	2596.8	2602.2	2609.5	2598.3	2597.3	2595.9	2600

Cuadro 4.16: Resultados de las repeticiones de las pruebas de calibración del OAE para el momento a 0.64m.

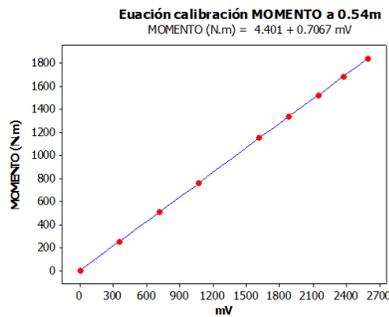
N.m	R1	R2	R3	R4	R5	R6	PROMEDIO
0	0	0	0	0	0	0	0
301.36	424.3	425.2	425	418	427.2	426.4	424.4
602.72	852.6	853	853.9	847.6	856.1	855.3	853.1
904.08	1279.4	1279.2	1281.6	1275.9	1283.5	1266.3	1277.6
1362.41	1940.1	1932.5	1941	1936.3	1941.9	1946.3	1939.7
1582.15	2264.3	2259.7	2263.9	2257.3	2264.2	2222.6	2255.3
1801.9	2585.3	2581.2	2583.5	2576.6	2583.6	2581	2581.9
1990.25	2855.5	2852.2	2853.4	2846.9	2853.4	2852.6	2852.3
2178.6	3126.3	3128.8	3124.3	3120.9	3127.5	3124.8	3125.4

Cuadro 4.17: Resultados de las repeticiones de las pruebas de calibración del OAE para el momento a 0.74m.

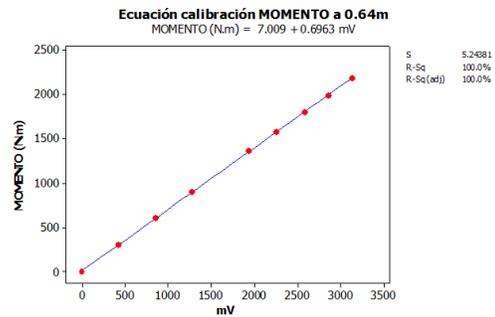
N.m	R1	R2	R3	R4	R5	R6	PROMEDIO
0	0	0	0	0	0	0	0
348.45	492.8	495.5	496.2	501.4	502.2	494.1	497
696.9	993.8	994.1	997.1	998.2	993.7	993.4	995
1045.35	1497.2	1492.5	1494.9	1498	1491.7	1494.2	1494.8
1575.29	2273.5	2325.5	2305	2264.5	2262.1	2260.6	2281.9
1829.36	2651.9	2682	2672.1	2653.1	2651.2	2640.6	2658.5
2083.44	3032	3050.3	3042.4	3021.2	3019.9	3017.8	3030.6
2301.23	3351.2	3335.5	3360.7	3339.3	3334.2	3333.6	3342.4
2519.01	3675.7	3659.4	3671.3	3662.2	3656.5	3659.9	3664.2

registrando una sensibilidad de $0,7067 Nm \cdot mV^{-1}$.

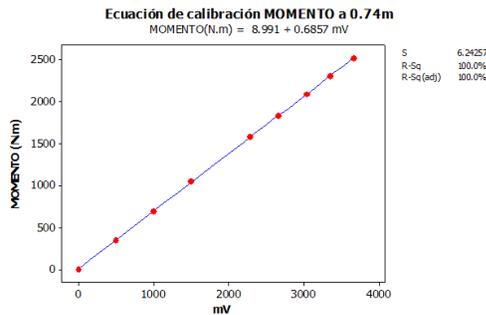
- Para el momento de fuerza a 0.64m, un coeficiente de correlación (R-Sq) del 100 % entre los momentos aplicados (N.m) y los valores de deformación obtenidos en (mV), registrando una sensibilidad de $0,6963 Nm \cdot mV^{-1}$.
- Para el momento de fuerza a 0.74 m, un coeficiente de correlación (R-Sq) de 100 % entre las cargas aplicadas (N) y los valores de deformación obtenidos en (mV) , registrando una sensibilidad de $0,6857 Nm \cdot mV^{-1}$.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.45: Ecuación de calibración del momento para 3 posiciones: a) 0.54, b) 0.64 y c) 0.74 m.

En el Cuadro (4.18) se observa un resumen de los resultados obtenidos para las 3 posiciones en momento de fuerza o brazo de palanca.

Los resultados mostraron una linealidad superior al 99 % entre la salida de

Cuadro 4.18: Resumen de resultados obtenidos para 3 posiciones de las pruebas de calibración de fuerzas del OAE el momento.

Distancia (m)	MOMENTO (N.m)
0.54	$0,7067Nm \cdot mV^{-1}$
0.64	$0,6963Nm \cdot mV^{-1}$
0.74	$0,6857Nm \cdot mV^{-1}$

voltaje del puente y la carga aplicada, para la FX Y MOMENTO del sensor. Resultados similares fueron reportados por O'Dogherty (1975); Godwin *et al.*, (1993); McLaughlin *et al.*, (1998); Khan *et al.*, (2006). Al realizar calibraciones de octagonales de anillo extendidos desarrollados para determinar las fuerzas FX, FY Y MOMENTO que actúan en los implementos de labranza.

Resultados del análisis estadístico.

Los resultados obtenidos para la FX demuestran que no existe diferencia estadística significativa entre tratamientos (posición de la fuerza). Por lo que se utiliza una sola ecuación para cualquier posición en las mediciones de fuerza.

Los resultados obtenidos para momento demuestran que existe diferencia estadística significativa entre tratamientos (posición de la fuerza). A continuación se muestra el análisis estadístico. Se realizaron 3 pruebas con cambios de la distancia de la fuerza aplicada o posición de la herramienta a 0.54, 0.64, 0.74 m (tratamientos; 1, 2, y 3) realizando 6 repeticiones para cada tratamiento, los cuales se muestra en el Cuadro (4.19).

Cuadro 4.19: Datos de las ecuaciones de calibración para momento

	MOMENTO					
Tratamiento	R1	R2	R3	R4	R4	R6
T1	0.707	0.705	0.707	0.708	0.707	0.708
T2	0.695	0.696	0.696	0.696	0.696	0.697
T3	0.674	0.682	0.683	0.687	0.688	0.689

En el Cuadro (4.20) se muestra el análisis de varianza realizado en el Programa estadístico R, donde se aprecia que p-valor es menor al 0.01; por lo tanto existe una alta diferencia estadística significativa entre los tratamientos, es decir, al menos una de las medias de los tratamientos es diferente de los demás.

Cuadro 4.20: Análisis de varianza para momento.

ANALISIS DE VARIANZA PARA FX					
	GL	SC	CM	F	P>F
Tratamiento	2	0.0016	0.0008	73.36	0
Error	15	0.0002	0.0000109		
Total	17	0.0018			

En el Cuadro (4.21) se puede observar que todos los tratamientos son estadísticamente diferentes al cambio de la distancia de la fuerza aplicada en una prueba de medias con una prueba TUKEY con 0.05 de significancia.

Cuadro 4.21: Comparación de medias Tukey ($P>0.05$) para momento.

COMPARACION DE MEDIAS			
tratamiento	concepto	Medias	Significancia
1	0.54	0.707	a
2	0.64	0.6961	b
3	0.74	0.6839	c

Lo que significa que al aumentar la distancia de la fuerza, la ecuación de calibración disminuirá para el momento.

4.4.4. Resultados de prueba en campo

En la Figura (4.46) se muestra la ubicación del sensor de (RCS) acoplado con la herramienta de corte y el sensor de humedad montados al carro-porta sensores para mediciones en forma dinámica, ambos parámetros son importantes para determinar la energía del laboreo de suelos.

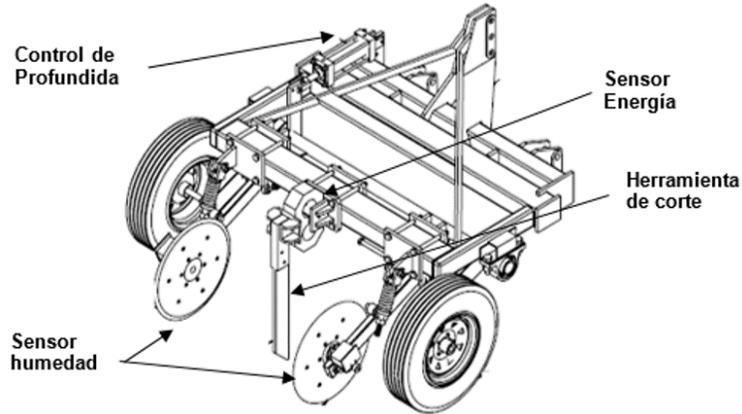


Figura 4.46: Ubicación del sensor acoplado en el carro-portal.

Los resultados de la prueba en campo, se utilizó un octagonal con capacidad de 40 KN. Donde se realizaron pruebas a 0.20 ,0.30 y 0.40m de profundidad. Con ayuda de una herramienta de corte, el sensor utilizado tiene una sensibilidad de calibración de $15,65NmV^{-1}$.

En la Figura (4.47) se muestran los resultados de las gráficas obtenidas bajo condiciones de campo donde se determina la magnitud de la fuerza para las profundidades de 0.20 , 0.30 y 0.40 m. Las unidades de registros de las fuerzas fueron en Newton (N).

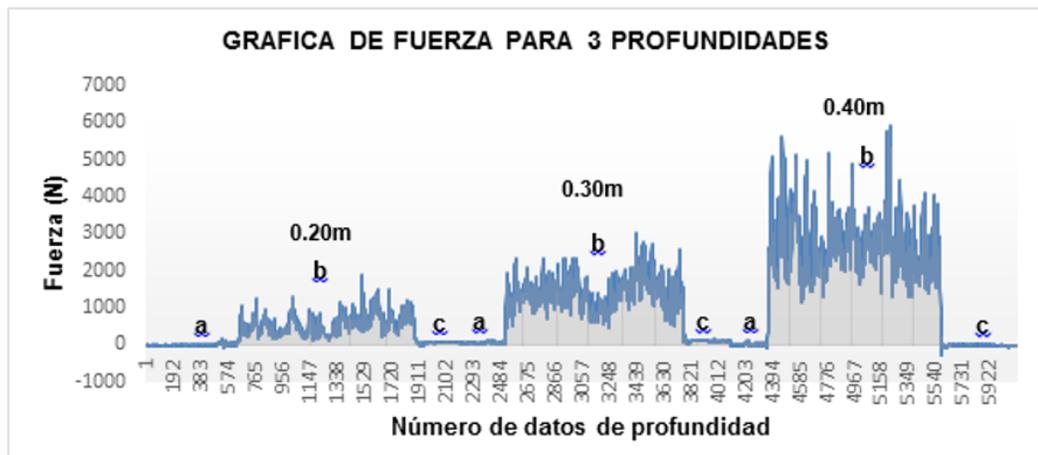


Figura 4.47: Resultados de campo para el sensor de energía a diferentes profundidades

En la sección (a) de las gráficas se aprecia cuando la herramienta aún no ha penetrado el suelo por lo que se encuentra estable. En la sección (b) la herramienta de corte ya está penetrando el suelo a las profundidades establecidas y manda las señales de fuerza. En la sección (c) las señales del sensor se estabilizan, esto debido a que la herramienta ya no está penetrando el suelo. En la gráfica se observa también la demanda de fuerza al cambio de profundidad.

4.4.5. Resultados de la obtención de energía de roturación

Para la determinación de la energía de roturación de suelo, se obtendrá el área bajo la curva para cada profundidad de 0.20, 0.30 y 0.40 m, esto se realizará en el software Matlab VR2012b. con la ayuda del comando para determinar el área de una función (`trapez(x,y)`). A continuación se describe el proceso de obtención de la energía.

1. En el software Matlab se colocan los valores de x, el cual está representado por los valores de distancia total recorrida (m).
2. Para Y se colocan los valores de fuerza obtenidos durante la prueba, estos son el resultado de multiplicar los valores de mV por la constante del sensor.
3. Se verifican los datos poniendo en comando `plot(x,y)` y muestra la gráfica de comportamiento para los 100m. de distancia.
4. A continuación se escribe el comando `trapez(x,y)` y se obtienen el resultado del área bajo la curva, que indica la energía aplicada en una distancia de 100m.

En la Figura (4.48) se observa el área bajo la curva de la gráfica obtenida para la profundidad de 0.20m, la gráfica muestra la distancia total de la prueba

(100m) y la fuerza aplicada para cada distancia los resultados obtenidos son expresados en términos de energía Joules (J).

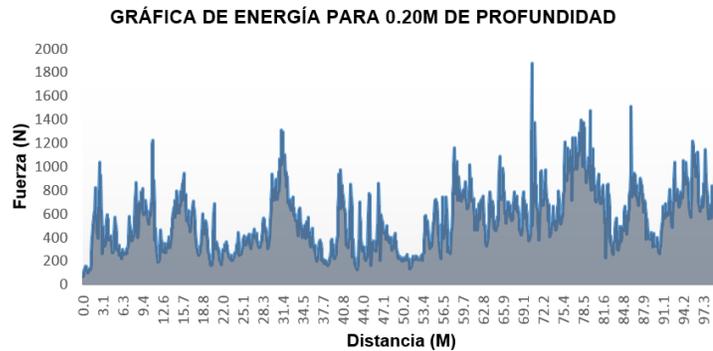


Figura 4.48: Resultados de campo para el sensor de energía a diferentes profundidades

En la Figura (4.49) se observa el área bajo la curva de la gráfica obtenida para la profundidad de 0.30m, la gráfica muestra la distancia total de la prueba (100m) y la fuerza aplicada para cada distancia los resultados obtenidos son expresados en términos de energía Joules (J).

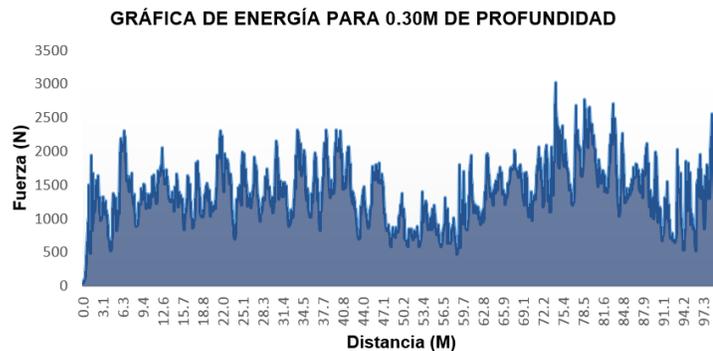


Figura 4.49: Resultados de campo para el sensor de energía a diferentes profundidades

En la Figura (4.50) se observa el área bajo la curva de la gráfica obtenida para la profundidad de 0.40m, la gráfica muestra la distancia total de la prueba (100m) y la fuerza aplicada para cada distancia los resultados obtenidos son expresados en términos de energía Joules (J).

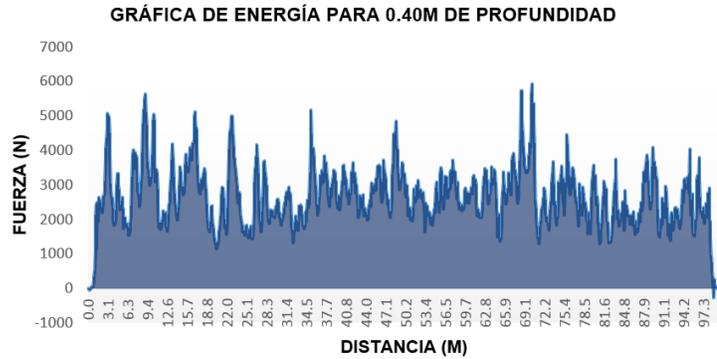


Figura 4.50: Resultados de campo para el sensor de energía a diferentes profundidades

En el Cuadro (4.22) se muestra los resultados de energía encontrados para una distancia de 100m lineales con un ancho de roturación de 0.25m, transformados para una Ha.

Cuadro 4.22: Demanda de energía para 100m lineales y por hectarea

profundidad (m)	Joules (KJ)	MJ/Ha
0.2	55.86	27.9285
0.3	140.7	70.35
0.4	267.24	133.62

Donde se observa claramente que al aumentar la profundidad aumenta la energía requerida para el laboreo de suelos en forma no lineal pero proporcional al cuadrado de la profundidad de laboreo afectado por el valor de la cohesión y densidad del suelo como se muestra en la ecuación universal del mecánica de suelos (Ecuación 4.3) descrita por McKyes y Ali (1977).

$$P = (\gamma g d^2 N_\gamma + C d N_c + q d N_q) W \quad (4.3)$$

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Se desarrolló un sensor para medición de fuerza integrado por un anillo y una herramienta de penetración tipo cono con una capacidad de medición de hasta 9MPa, obteniendo una sensibilidad de $13,15mVN^{-1}$ y una alta confiabilidad de sensado con coeficientes de correlación del 99.6 %.

Se desarrolló un sensor de profundidad integrado por: sonar MAX-EZ1, dos amplificadores de instrumentación AD620AN en serie con configuración de filtro y un filtro pasa-bajo. La capacidad del sensor 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 $258,5mmV^{-1}$ con un coeficiente de correlación de 100 % entre la profundidades de penetración y la salida de voltaje. El porcentaje de ruido a la salida del sensor fue menor al 1 %, permitiendo una alta confiabilidad para la medición de la profundidad de penetración.

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, profundidad y magnitud de las capas compactadas.

Se diseñó el sensor para medir la humedad del suelo basado en un puente de Wheatstone con configuraciones de puente capacitivo o resistivo para hume-

dad y CE, respectivamente. La calibración del sensor capacitivo presento una alta confiabilidad obteniendo valores muy similares a los obtenidos con instrumentos de laboratorio. El sensor tiene una ecuacion de $humedad = 10,58 + 0,04105mV - 0,000012mV^2$ y un coeficiente de correlación de 97.5 % entre la humedad conocida y el voltaje de salida. Al realizar una transformación logarítmica se obtuvo una ecuacion de $humedad = -34,65 + 10,57\ln(mV)$ y un coeficiente de correlación de 98 % en forma lineal, obteniendo un coeficiente de correlación para mediciones de humedad mayores al 90 % con respecto al método gravimétrico.

El transductor octagonal de anillo extendido (OAE) desarrollado para medición de (RC) del suelo y evaluado a tres profundidades permite estimar la energía aplicada para laboreo de suelo.

5.2 Recomendaciones

Se requiere realizar el interfaz para el registro de una variable externa en el controlador AgGPSFMX a través de los puertos de entrada para obtener el registro en tiempo real de las variables (RP), (RC) y sus coordenadas geograficas con alta precisión utilizando la tecnología GPS-RTK.

Para la evaluación en campo del sensor de permisividad electrica utilizar el arreglo de WENNER empleando un par de discos para medición de humedad y el otro par para C.E. del suelo. Y la conexión con el LogBook360 + AgGPSFMX.

Elaborar mapas de energía y obtener una correlación entre las mediciones de resistencia a la penetración y energía de roturación de suelo.

Capítulo 6

LITERATURA CITADA

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.

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

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.

Al-Janobi, A.A. and S.A. Al-Suhaibani. 1995. Setup of a calibration rig in a mobile instrumentation package. J. Agric. Res. 40(2): 1-15.

Alonso Sarria, f. 2000. Introducción a los sistemas de información geográfica. Disponible en: <http://www.um.es/geograf/sig/siggf2000/temario.pdf>

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, P.; Upadhyaya K.; Jenkins M.; Plouffe C. and POUTRE B.: 2004. Field evaluation of the improved version of the UCDavis compaction profile sensor (UCD CPS), 12pp. ASAE Paper: 041037, USA.

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.

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.

Atwell, B.J. 1993. Response of roots to mechanical impedance. Environmental and experimental botany 33(1): 27-40.

Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A (ED.). 2006. Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable, PROCISUR, Montevideo, URUGUAY.

Bradford, J. L. 1986. Penetrability. In: Methods of Soil Analysis, Madison, ASASS-SA Inc. Publisher, 463-477.

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.

Burrough P.A. y McDonnell .1998. Principles of geographical information systems. Oxford University Press. 333 p.

Campos, M.S.G, B. Wills and 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, Gto., 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. 1995. Force measurement recording and data analysis for tillage tools. Agric. Mechanization in Asia, Africa and Latin America 26(4): 13-16.

Campos, M.S.G., R.A. Aragón and 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.

Carvalho, G.E. 2004. Geoestadística básica y aplicada. En: núcleo de estudos estatísticos e biométricos, faculdade de matemática universidade federal de uberlândia.

Cassel, D.K., Kachanoski, R.G. and Topp, G.C. 1994: Practical consideration for using a TDR cable tester. *Soil Technology*. 7. pp.113-126.

Calderón S. F. 2005, Como construir un conductivímetro , 29 de junio, http://www.drcalderonlabs.com/Aparatos/Conductivimetro/Construir_un_Conductivimetro/Construccion.htm

Clark R.L. 1999 Evaluation of the potential to develop soil strength maps using a cone penetrometer. ASAE Paper No. 993109. St. Joseph, Michigan, USA.

Cook N.H. and E. Rabinowicz. 1963. *Physical measurement and analysis*, N.Y.: Addison Wesley, pp. 160–164.

Cooper D.W. and Helfrick D.A. 1991. *Instrumentación Electrónica Moderna y Técnicas de Medición*, p. 101.

Corwin D.L., and Rhoades J.D., 1981. Determining soil electrical conductivity using an inductive electromagnetic soil conductivity meter; *Soil Sci. Soc. Amer. J* 45:255-260

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. and Castro, R. 2010. Spatial analysis of physical attributes and organic carbón from yellow-red alfissol with sugarcane crop. *ciencia e agrotecnologia, lavras*, 34(2):217-278.

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. Dasberg, S. and Dalton, F.N. 1985: Time Domain Reflectometry measurements of soil water content and electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49. pp. 293-297.

De León G. F., Payán Z. F. y Sánchez S. 1998, Localización de capas compactadas en el perfil del suelo mediante Penetrómetro, *Revista Terra*, 16(4): 303-307.

Doran, J.W., Parkin, T.B., Coleman, D.C., Bezdicsek, D.F. and Stewart, B.A., 1994 *Defining and Assessing Soil Quality*. In *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment* eds., Soil Sci. Soc. Amer. Madison, Wis., p 3-21.

Earl, R., Thomas G. and Blackmore B. 2000. The potential role of GIS in auto-

nomous field operations. *Comput. Electron. agric.* 25: 107–120.

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. 2003. Agricultura de conservación, uniendo producción con sostenibilidad http://www.fao.org/ag/ags/AGSE/agse_s/general/OBJECT.htm

FAO. 2009. Guía para la descripción del suelo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.

Fidalski, J.; Tormena, C. A.; Scapim, C. A. 2007. Espacialização vertical e horizontal dos indicadores de qualidade para um Latossolo Vermelho. *Rev. Bras. Ci. Solo* 31(1):9 - 19.

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 Unidad para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 4: 29-38. Roma Italia.

Godwin, R. J. 1975. An Extended Octagonal Ring Transducer for Use in Tillage Studies. *J. Agric. Eng. Res.*, 20: 347-352.

Godwin, R. J., A. J. Reynolds, M. J. O Dogherty and A.A. Al-Ghazal. 1993. A triaxial dynamometer for force and moment measurements on tillage implements. *J. Agric. Engng. Rese.*, 55(3): 189-205.

Godwin, R.J., P.S.G. Magalhaes, S.M. Miller and R. K. 1987. Instrumentation to study the force system and vertical dynamic behavior of soil engaging implements. *J. Agric. Eng. Res.*, 36: 301-310.

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.

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. 111 p.

Hoag, D.L. and R.R. Yoerger. 1974. Designing load rings for measurement. *Transactions of de ASAE* 17(2):251-253,261.

Hoag, D.L. and Yoerger, R.R., 1975. Analysis and design of load rings. *Trans.*

ASAE 19, 995–1000.

Hoogmoed, W. 1994. Tillage for soil and water conservation in the semi-arid tropics. Wageningen Agricultural University. The Netherlands.

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.

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. En: filgueira, r. y micucci, f. edulp (eds.). Metodologías físicas para la investigación del suelo: penetrometría e infiltrometría. 43-53.

Khan, J., R.J. Godwin, J. Kilgour and B.S. Blackmore. 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. A. Yahya, M. Zohadie and W. Ishak. 2003. Design and development of a three-point auto hitch dynamometer for an agricultural tractor. AJSTD, 20(3 and 4): 271-288.

Korkut, I. 2003. A Dynamometer design and Its construction for milling operation. Materials and Design, 24(8): 631-637.

Khosla, R., Fleming K., Delgado J. A., Shaver T. M., Westfall D. G. 2002. Use of site-specific management zones to improve nitrogen management for precision agriculture. J. Soil Water Conserv. 57:513-518. **Krüger, g.; Springer, r.; Lechner, w.,** 1994. Global navigation satellite systems (gnss). Computers and electronics in agriculture.11:3-21.

Lackas, G.M., R.D. Grisso, M. Yasin and L.L. Bashford. 1991. Portable data acquisition system for measuring energy requirements of soil engaging implements. Computers and Electronics in Agriculture 5:285-296.

Laffita Leyva, Alexander; Ramos Carbajal, Ernesto; García de la Figal Cos-

tales, Armando; Valdés Hernández, Pedro A.; Torres Cepero, Raúl. 2012. Diseño, construcción y calibración de un transductor de fuerza tipo S. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias 21:11-16.

Lickso, Z.J. and Harrison P.H. 1988. Acquisition and processing of soil reaction forces on tillage tools. Trans. ASAE 3(1): 315-318.

Liu,W., Upadahyaya, 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., E.R. Marshall and M.C. Shaw. 1951. Electric Strain Gauge Tool Dynamometers. Proc. Soc. Exp. Stress Analysis, 8(2): 1-16.

Lowenberg, J. 2001. Agricultura de precisión en EE.UU. y potencial de adopción en los países en desarrollo. Universidad de purdue.

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.

Martínez, R. A. 2008. Sistema de medición. Aplicación Ingeniería Mecánica Agrícola, 52pp., Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Mecanización, La Habana, (reseña).

McKyes, E. y Alí, O. S. 1977. The cutting of soil by narrow blades. J. Terramech.(UK) 14(2): 43-58.

McLaughlin, N. B. 1996. Correction of in Equation for Extended Ring Transducers. Trans. ASAE, 39(2): 443-444.

McLaughlin, N. B., S. Tessier and A. Guilbert. 1998. Improved Double Extended Octagonal Ring Drawbar Transducer for 3-D Measurement. Can. Agric. Eng., 40: 257-264.

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.

Nadler, A., Dasberg, S. y Lapid, I. 1991: Time Domain Reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns. Soil Sci. Soc. Am. J. 55. pp. 938-943.

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.

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.

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.

Porta C.J., López R.M., Roquero D.C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi Prensa. España. 3ª ed. 929 p.

Pires da silva, A.; Inhoff, S. y Corsi, M. 2003. Evaluation of soil compaction in an irrigated short grazing system. Soil and tillage research 70(1): 83-90.

Rhoades, J.D., Raats, P.A., y Prather, R.J. 1976. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J., 40:651-655.

Ritter, C., y Regalado M., 2007. Eficacia de un sensor de capacitancia para medir simultáneamente salinidad y contenido hídrico; Instituto canario Inv. Agrarias (ICIA), Dep. Suelos y Riegos.

Roth, K., Schulin, R., Flühler, H., and Attinger, W. 1990. Calibration of Time Domain Reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. Water Resources Research. (26)2267-2273.

Rucks, L., García F., Kaplan A., Ponce L. J., Hill M. 2004. Propiedades Físicas del suelo. Facultad de Agronomía, Departamento Suelos y Aguas; Universidad de la Republica. Montevideo, Uruguay. 68 p.

Salas S. R. 2013. Evaluación en campo y generación de mapas de sensores de resistencia a la penetración, energía y resistencia a la falla. Tesis de Licenciatura. UAAAN. Saltillo, Coahuila, México. 83 p.

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).

Shibusawa, S. 1998. Precision farming and terra-mechanics. Fifth ISTVS Asia-pacific regional conference in Korea, October: 20-22.

Simon R., Whinnery J.R., y Van T. 1974. Campos y Ondas. Aplicación a las comunicaciones electrónicas. Ediciones Pirámide S.A., 6:344-347.

Sun Y., Ma D., Schulze P., Schmittmann O. and Rose M. 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. Journal of Soil Science, Oxford, (96):153-156.

Tops, G.C., Davis, J.L. y Annan, A.P. 1980: Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. Water Resources Research. 16. pp. 574-582.

Topp, G.C. y Davis, J.L. 1985. Measurement of soil water content using time-domain reflectometry (TDR): A field evaluation. Soil Sci. Soc. Am. J. 49. pp. 19-24.

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 and K Equipment to Strain Measurements. Brüel and Kjaer, Copenhagen.

Venialgo, C. 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-ROM

Warrick, A.W. and Nielsen, D.R. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field, In: Applications of soil physics, New York: Academic Press, p.319-44.

Capítulo 7

ANEXOS

ANEXO A. Hoja de datos Amplificador de instrumentación AD620AN.



Low Cost, Low Power Instrumentation Amplifier

AD620

FEATURES

EASY TO USE

Gain Set with One External Resistor
(Gain Range 1 to 1000)
Wide Power Supply Range (± 2.3 V to ± 18 V)
Higher Performance than Three Op Amp IA Designs
Available in 8-Lead DIP and SOIC Packaging
Low Power, 1.3 mA max Supply Current

EXCELLENT DC PERFORMANCE ("B GRADE")

50 μ V max, Input Offset Voltage
0.6 μ V/ $^{\circ}$ C max, Input Offset Drift
1.0 nA max, Input Bias Current
100 dB min Common-Mode Rejection Ratio ($G = 10$)

LOW NOISE

9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$, @ 1 kHz, Input Voltage Noise
0.28 μ V p-p Noise (0.1 Hz to 10 Hz)

EXCELLENT AC SPECIFICATIONS

120 kHz Bandwidth ($G = 100$)
15 μ s Settling Time to 0.01%

APPLICATIONS

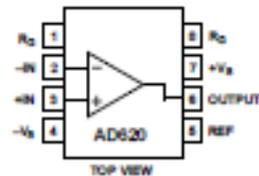
Weigh Scales
ECG and Medical Instrumentation
Transducer Interface
Data Acquisition Systems
Industrial Process Controls
Battery Powered and Portable Equipment

PRODUCT DESCRIPTION

The AD620 is a low cost, high accuracy instrumentation amplifier that requires only one external resistor to set gains of 1 to

CONNECTION DIAGRAM

8-Lead Plastic Mini-DIP (N), CerDip (Q)
and SOIC (R) Packages



1000. Furthermore, the AD620 features 8-lead SOIC and DIP packaging that is smaller than discrete designs, and offers lower power (only 1.3 mA max supply current), making it a good fit for battery powered, portable (or remote) applications.

The AD620, with its high accuracy of 40 ppm maximum nonlinearity, low offset voltage of 50 μ V max and offset drift of 0.6 μ V/ $^{\circ}$ C max, is ideal for use in precision data acquisition systems, such as weigh scales and transducer interfaces. Furthermore, the low noise, low input bias current, and low power of the AD620 make it well suited for medical applications such as ECG and noninvasive blood pressure monitors.

The low input bias current of 1.0 nA max is made possible with the use of Superbeta processing in the input stage. The AD620 works well as a preamplifier due to its low input voltage noise of 9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at 1 kHz, 0.28 μ V p-p in the 0.1 Hz to 10 Hz band, 0.1 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ input current noise. Also, the AD620 is well suited for multiplexed applications with its settling time of 15 μ s to 0.01% and its cost is low enough to enable designs with one in-amp per channel.

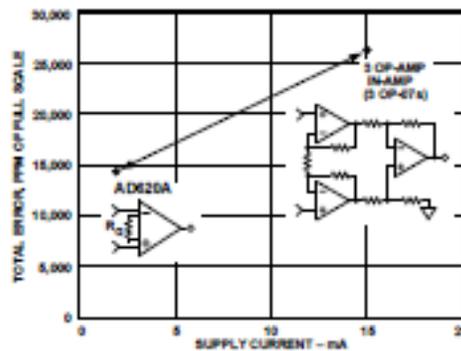


Figure 1. Three Op Amp IA Designs vs. AD620

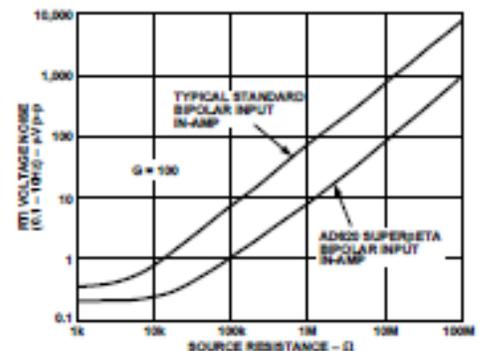


Figure 2. Total Voltage Noise vs. Source Resistance

REV. E

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
Tel: 781/329-4700 World Wide Web Site: <http://www.analog.com>
Fax: 781/326-8703 © Analog Devices, Inc., 1999

Precision V-I Converter

The AD620, along with another op amp and two resistors, makes a precision current source (Figure 37). The op amp buffers the reference terminal to maintain good CMR. The output voltage V_X of the AD620 appears across R_1 , which converts it to a current. This current less only, the input bias current of the op amp, then flows out to the load.

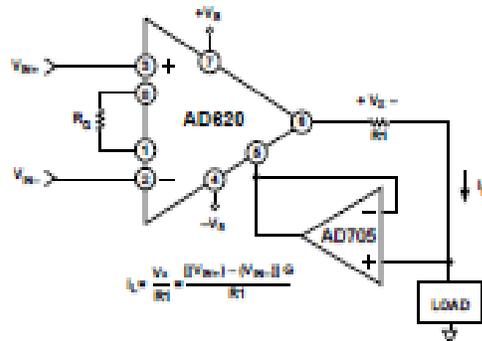


Figure 37. Precision Voltage-to-Current Converter (Operates on 1.8 mA, ±3 V)

GAIN SELECTION

The AD620's gain is resistor programmed by R_G , or more precisely, by whatever impedance appears between Pins 1 and 8. The AD620 is designed to offer accurate gains using 0.1%–1% resistors. Table II shows required values of R_G for various gains. Note that for $G = 1$, the R_G pins are unconnected ($R_G = \infty$). For any arbitrary gain R_G can be calculated by using the formula:

$$R_G = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{G - 1}$$

To minimize gain error, avoid high parasitic resistance in series with R_G ; to minimize gain drift, R_G should have a low TC—less than 10 ppm/°C—for the best performance.

Table II. Required Values of Gain Resistors

1% Std Table Value of R_G , Ω	Calculated Gain	0.1% Std Table Value of R_G , Ω	Calculated Gain
49.9 k	1.990	49.3 k	2.002
12.4 k	4.984	12.4 k	4.984
5.49 k	9.998	5.49 k	9.998
2.61 k	19.93	2.61 k	19.93
1.00 k	50.40	1.01 k	49.91
499	100.0	499	100.0
249	199.4	249	199.4
100	495.0	98.8	501.0
49.9	991.0	49.3	1,003

INPUT AND OUTPUT OFFSET VOLTAGE

The low errors of the AD620 are attributed to two sources, input and output errors. The output error is divided by G when referred to the input. In practice, the input errors dominate at high gains and the output errors dominate at low gains. The total V_{OS} for a given gain is calculated as:

$$\text{Total Error RTI} = \text{input error} + (\text{output error}/G)$$

$$\text{Total Error RTO} = (\text{input error} \times G) + \text{output error}$$

REFERENCE TERMINAL

The reference terminal potential defines the zero output voltage, and is especially useful when the load does not share a precise ground with the rest of the system. It provides a direct means of injecting a precise offset to the output, with an allowable range of 2 V within the supply voltages. Parasitic resistance should be kept to a minimum for optimum CMR.

INPUT PROTECTION

The AD620 features 400 Ω of series thin film resistance at its inputs, and will safely withstand input overloads of up to ± 15 V or ± 60 mA for several hours. This is true for all gains, and power on and off, which is particularly important since the signal source and amplifier may be powered separately. For longer time periods, the current should not exceed 6 mA ($I_{IN} \leq V_{DD}/400 \Omega$). For input overloads beyond the supplies, clamping the inputs to the supplies (using a low leakage diode such as an FD333) will reduce the required resistance, yielding lower noise.

RF INTERFERENCE

All instrumentation amplifiers can rectify out of band signals, and when amplifying small signals, these rectified voltages act as small dc offset errors. The AD620 allows direct access to the input transistor bases and emitters enabling the user to apply some first order filtering to unwanted RF signals (Figure 38), where $RC \approx 1/(2\pi f)$ and where $f \geq$ the bandwidth of the AD620; $C \leq 150$ pF. Matching the extraneous capacitance at Pins 1 and 8 and Pins 2 and 3 helps to maintain high CMR.

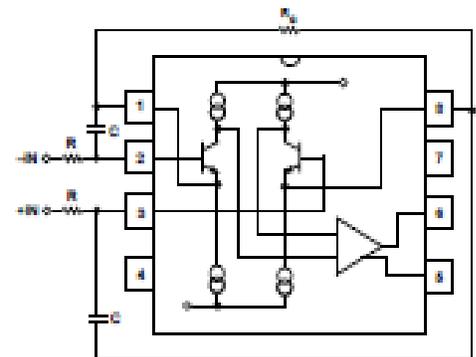


Figure 38. Circuit to Attenuate RF Interference

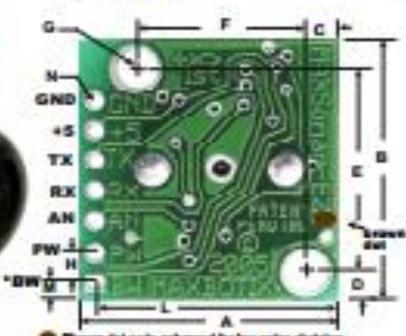
ANEXO B. Hoja de datos LV-MAX-SONAR-EZ1.

LV-MaxSonar®-EZ1™

High Performance Sonar Range Finder

With 2.5V - 5.5V power the LV-MaxSonar®-EZ1™ provides very short to long-range detection and ranging, in an incredibly small package. The LV-MaxSonar®-EZ1™ detects objects from 0-inches to 254-inches (6.45-meters) and provides sonar range information from 6-inches out to 254-inches with 1-inch resolution. Objects from 0-inches to 6-inches range as 6-inches. The interface output formats included are pulse width output, analog voltage output, and serial digital output.

MB1010



A	0.785"	19.9 mm	H	0.100"	2.54 mm
B	0.870"	22.1 mm	J	0.810"	15.3 mm
C	0.100"	2.54 mm	K	0.845"	16.4 mm
D	0.100"	2.54 mm	L	0.735"	18.7 mm
E	0.870"	17.0 mm	M	0.085"	1.7 mm
F	0.510"	12.8 mm	N	0.038"	1.0 mm
G	0.124"	3.1 mm	weight: 4.3 grams		

values are nominal

Features

- Continuously variable gain for beam control and side lobe suppression
- Object detection includes zero range objects
- 2.5V to 5.5V supply with 2mA typical current draw
- Readings can occur up to every 50mS, (20-Hz rate)
- Free run operation can continually measure and output range information
- Triggered operation provides the range reading as desired
- All interfaces are active simultaneously
- Serial, 0 to Vcc, 9600Baud, 81N
- Analog, (Vcc/512) / inch
- Pulse width, (147uS/inch)
- Leams ringdown pattern when commanded to start ranging
- Designed for protected indoor environments
- Sensor operates at 42KHz
- High output square wave sensor drive (double Vcc)

Benefits

- Very low cost sonar ranger
- Reliable and stable range data
- Sensor dead zone virtually gone
- Lowest power ranger
- Quality beam characteristics
- Mounting holes provided on the circuit board
- Very low power ranger, excellent for multiple sensor or battery based systems
- Can be triggered externally or internally
- Sensor reports the range reading directly, frees up user processor
- Fast measurement cycle
- User can choose any of the three sensor outputs

Beam Characteristics

People detection requires high sensitivity, yet a narrow beam angle requires low sensitivity. The LV-MaxSonar®-EZ1™ balances the detection of people with a narrow beam width. Sample results for measured beam patterns are shown below on a 12-inch grid. The detection pattern is shown for;

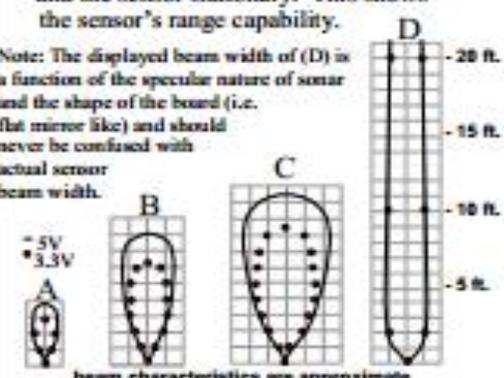
(A) 0.25-inch diameter dowel, note the narrow beam for close small objects,

(B) 1-inch diameter dowel, note the long narrow detection pattern,

(C) 3.25-inch diameter rod, note the long controlled detection pattern,

(D) 11-inch wide board moved left to right with the board parallel to the front sensor face and the sensor stationary. This shows the sensor's range capability.

Note: The displayed beam width of (D) is a function of the specular nature of sonar and the shape of the board (i.e. flat mirror like) and should never be confused with actual sensor beam width.



beam characteristics are approximate

LV-MaxSonar[®]-EZ1[™] Pin Out

GND – Return for the DC power supply. GND (& Vcc) must be ripple and noise free for best operation.

+5V –Vcc – Operates on 2.5V - 5.5V. Recommended current capability of 3mA for 5V, and 2mA for 3V.

TX – When the *BW is open or held low, the TX output delivers asynchronous serial with an RS232 format, except voltages are 0-Vcc. The output is an ASCII capital "R", followed by three ASCII character digits representing the range in inches up to a maximum of 255, followed by a carriage return (ASCII 13). The baud rate is 9600, 8 bits, no parity, with one stop bit. Although the voltage of 0-Vcc is outside the RS232 standard, most RS232 devices have sufficient margin to read 0-Vcc serial data. If standard voltage level RS232 is desired, invert, and connect an RS232 converter such as a MAX232.

● *Brown dot parts: When BW pin is held high the TX output sends a single pulse, suitable for low noise chaining (no serial data).

RX – This pin is internally pulled high. The EZ1[™] will continually measure range and output if the RX pin is left unconnected or held high. If held low the EZ1[™] will stop ranging. Bring high 20µs or more for range reading.

AN – Outputs analog voltage with a scaling factor of (Vcc/512) per inch. A supply of 5V yields ~9.8mV/in. and 3.3V yields ~6.4mV/in. The output is buffered and corresponds to the most recent range data.

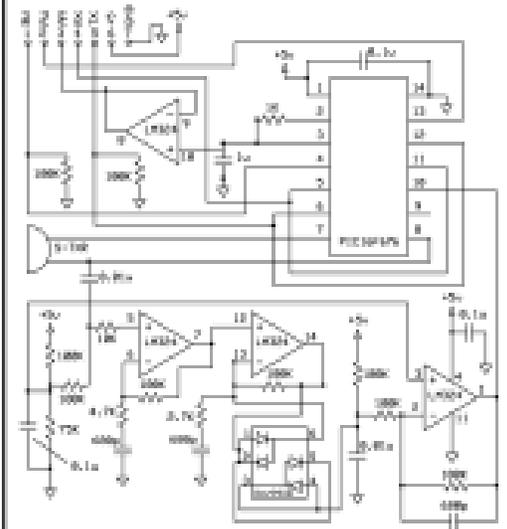
PW – This pin outputs a pulse width representation of range. To calculate distance use the scale factor of 147µs per inch.

BW – *Leave open or hold low for serial output on the TX output.

● *Brown dot parts: When BW pin is held high the TX output sends a pulse (instead of serial data), suitable for low noise chaining.

LV-MaxSonar[®]-EZ1[™] Circuit

The LV-MaxSonar[®]-EZ1[™] sensor functions using active components consisting of an LM324, a diode array, a PIC16F676, together with a variety of passive components.



LV-MaxSonar[®]-EZ1[™] Timing Description

250ms after power-up, the LV-MaxSonar[®]-EZ1[™] is ready to accept the RX command. If the RX pin is left open or held high, the sensor will first run a calibration cycle (49ms), and then it will take a range reading (49ms). After the power up delay, the first reading will take an additional ~100ms. Subsequent readings will take 49ms. The LV-MaxSonar[®]-EZ1[™] checks the RX pin at the end of every cycle. Range data can be acquired once every 49ms.

Each 49ms period starts by the RX being high or open, after which the LV-MaxSonar[®]-EZ1[™] sends thirteen 42KHz waves, after which the pulse width pin (PW) is set high. When a target is detected the PW pin is pulled low. The PW pin is high for up to 37.5ms if no target is detected. The remainder of the 49ms time (less 4.7ms) is spent adjusting the analog voltage to the correct level. When a long distance is measured immediately after a short distance reading, the analog voltage may not reach the exact level within one read cycle. During the last 4.7ms, the serial data is sent. The LV-MaxSonar[®]-EZ1[™] timing is factory calibrated to one percent at five volts, and in use is better than two percent. In addition, operation at 3.3V typically causes the objects range, to be reported, one to two percent farther than actual.

LV-MaxSonar[®]-EZ1[™] General Power-Up Instruction

Each time after the LV-MaxSonar[®]-EZ1[™] is powered up, it will calibrate during its first read cycle. The sensor uses this stored information to range a close object. It is important that objects not be close to the sensor during this calibration cycle. The best sensitivity is obtained when it is clear for fourteen inches, but good results are common when clear for at least seven inches. If an object is too close during the calibration cycle, the sensor may then ignore objects at that distance.

The LV-MaxSonar[®]-EZ1[™] does not use the calibration data to temperature compensate for range, but instead to compensate for the sensor ringdown pattern. If the temperature, humidity, or applied voltage changes during operation, the sensor may require recalibration to reacquire the ringdown pattern. Unless recalibrated, if the temperature increases, the sensor is more likely to have false close readings. If the temperature decreases, the sensor is more likely to have reduced up close sensitivity. To recalibrate the LV-MaxSonar[®]-EZ1[™], cycle power, then command a read cycle.

Product / specifications subject to change without notice. For more info visit www.maxbotix.com

MaxBotix[®] Inc.

MaxBotix, MaxSonar & EZ1 are trademarks of MaxBotix Inc.

LV-EZ1[™] - Patent 7,679,996 - Copyright 2005 - 2012

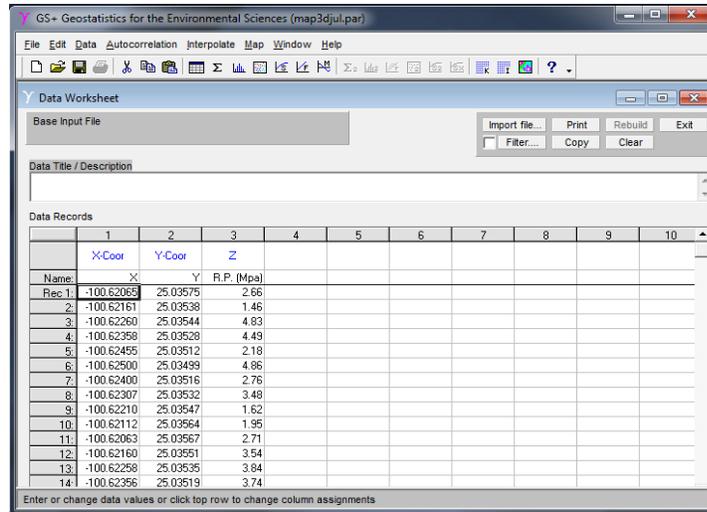
Email: info@maxbotix.com

Web: www.maxbotix.com

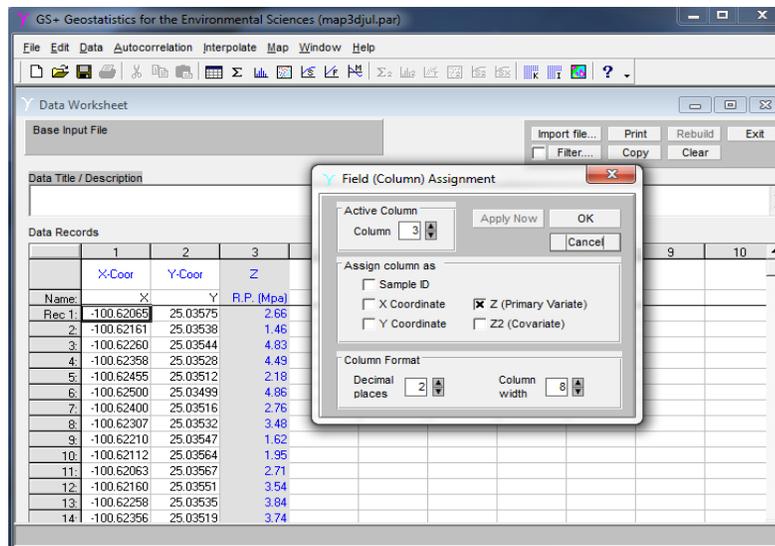
PC100006

ANEXO C. Elaboración de Mapas en software GS+ V9.

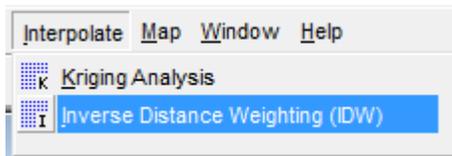
- Abrimos el software e iniciamos capturando los datos dentro de las celdas o también podemos copiar los datos desde EXCEL y pegamos en el programa las coordenadas junto con el valor a interpolar
- Captura de los datos en Gs+ Versión 9, en la celda X y Y se tienen que aumentar a cienmilésimas para las coordenadas.



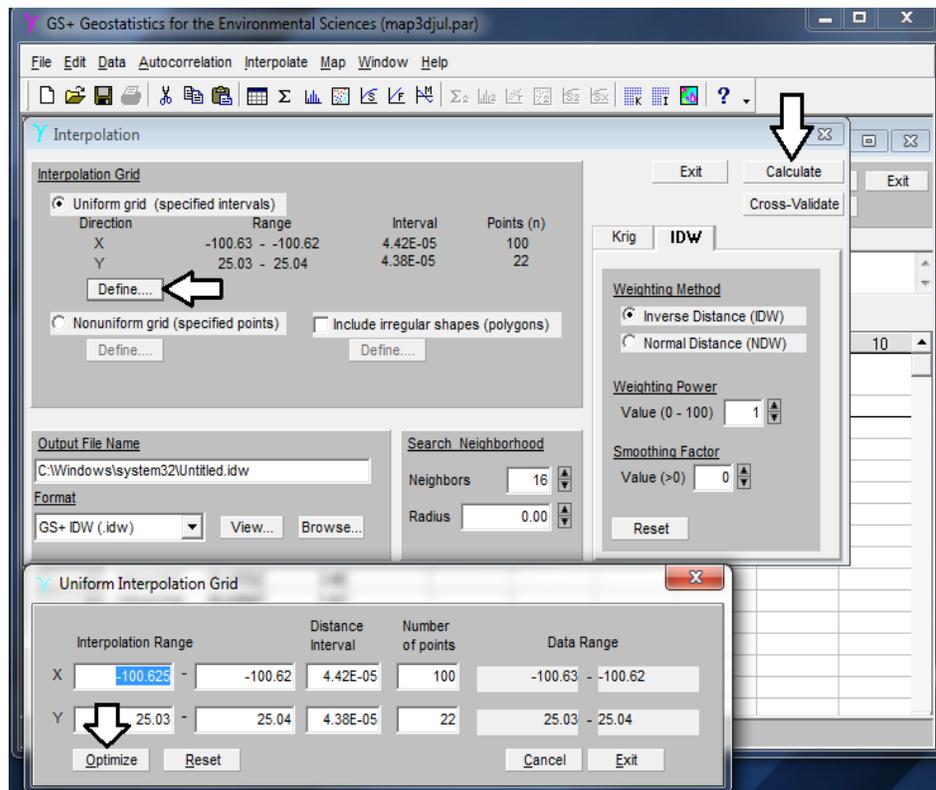
- Una vez capturados los datos en Gs+ doble clic en la celda, cambiando a modo “z (primary variate)” para seleccionar el calos de la Z que utilizaremos y cambiar el nombre de archivo.



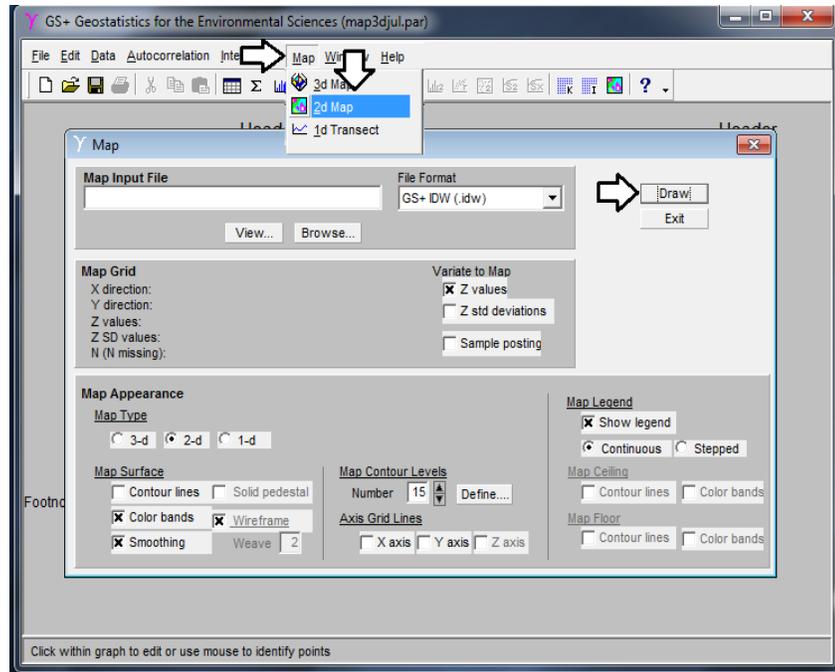
- Damos clic en interpólate y seleccionamos Inverse Distance Weighting (IDW).



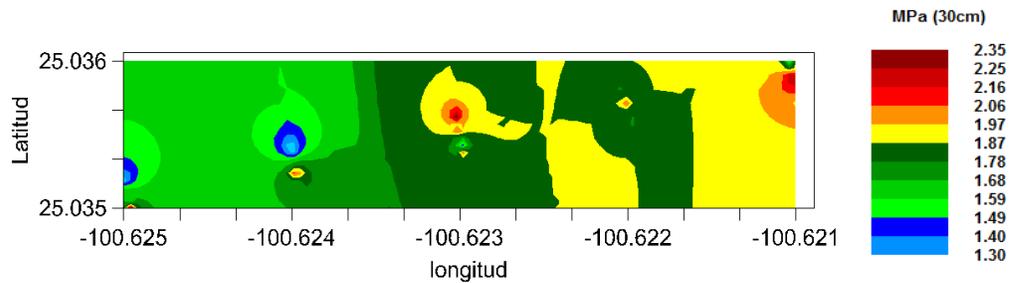
- Se desplaza la ventana de Interpolation, dar clic en **Calculate** y después **Define** desplazando otra ventana **Uniform Interpolation Grid** y seleccionar **optimize** para que no genere los puntos necesarios para el respectivo mapa.



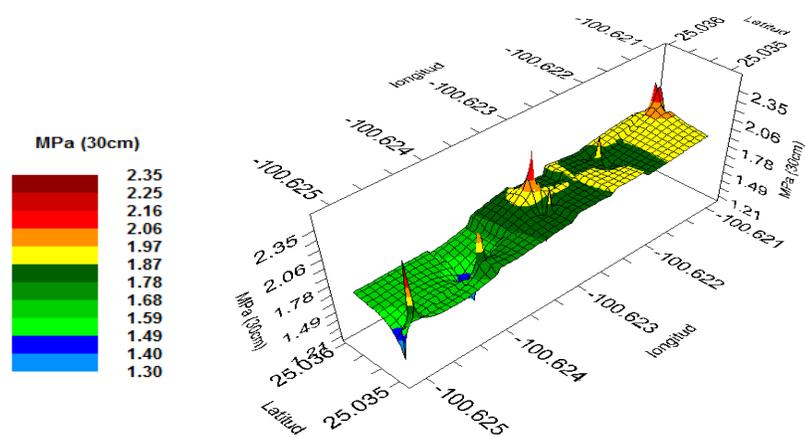
- Seleccionamos en **Map + 2D Map**, nos genera una nueva ventana llamada Map y seleccionamos **Draw**.



- Nos genera el mapa en 2D posteriormente se selecciona **Map+3D** **Map+Draw** y nos arroja el mapa 3D.



Mapa 2D.



Mapa de 3D

ANEXO D. 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 (D1) y (D2) para calcular el esfuerzo flexiónante y factor de seguridad respectivamente

$$\sigma = \frac{6Fr}{bt^2} \quad (D1)$$

$$\sigma_1 = \frac{6(10000)(0.025)}{(0.050)(0.025)^2} \quad \sigma_1 = \frac{1500Nm}{0.00003125m^3} \quad \sigma_1 = 48MPa$$

Dónde:

- ✓ σ = Esfuerzo flexiónante
- ✓ F = Fuerza (10000 N)
- ✓ r = Radio del ring (0.025 m)
- ✓ b = Ancho del ring (0.050 m)
- ✓ t = Espesor (0.025 m)

$$F_s = \frac{\sigma_p}{\sigma_l} \quad (D2)$$

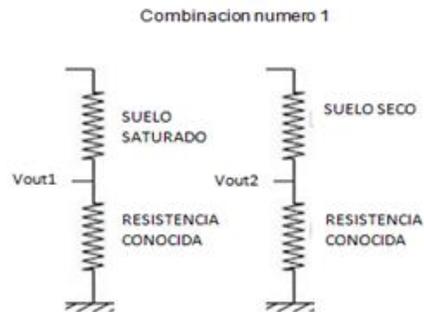
$$F_s = \frac{380MPa}{48MPa} = 7.91$$

- ✓ F_s = Factor de seguridad
- ✓ σ_p = Esfuerzo ultimo del material
- ✓ σ_l = Esfuerzo calculado

ANEXO E. Resultados de las combinaciones 1,3 y 4 del sensor de permisividad eléctrica

Resultados del ejercicio número 1, para el acondicionamiento del puente de Wheatstone, con resistencias conocidas.

Combinacion 1



En el cuadro (E2) y Figura (E2) se muestran los resultados de la prueba para corriente alterna (AC) que va directamente en el sensor y corriente directa (DC).

Cuadro E1: Resultados de la prueba de la sensibilidad para AC y DC.

RESISTENCIA	corriente alterna				corriente directa		
	Vin	Vout1	Vout2	diferencia	Vout1	Vout2	diferencia
5K	7.12 v	6.99 v	4.480 v	2.492	2.94	1.835	1.105
10K	7.12 v	7.04 v	5.48 v	1.544	3.01	2.28	0.73
20K	7.12 v	7.07 v	6.19 v	1.877	3.01	2.6	0.41
30K	7.12 v	7.09 v	6.45 v	0.611	3	2.71	0.29
40K	7.12 v	7.08 v	6.59 v	0.4672	3.73	3.46	0.27
50K	7.12 v	7.1 v	6.70 v	0.3875	3.01	2.84	0.17

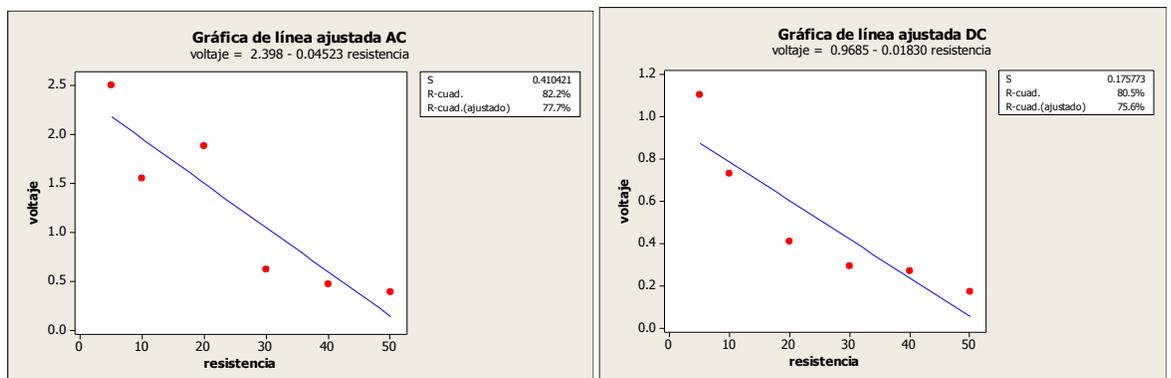
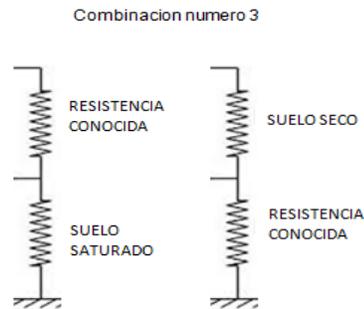


Figura E1: Gráfica de comportamiento para AC Y DC en la combinación 1

Resultados del ejercicio número 3, para el acondicionamiento del puente de Wheatstone, con resistencias conocidas.

Combinación 3:



En el cuadro (E2) y Figura (E2) se muestran los resultados de la prueba para corriente alterna (AC) que va directamente en el sensor y corriente directa (DC).

Cuadro E2: Resultados de la prueba de la sensibilidad para AC y DC.

RESISTENCIA	corriente alterna				corriente directa		
	Vin	Vout1	Vout2	diferencia	Vout1	Vout2	diferencia
A							
5K	7.08	0.1273	4.482	4.31	0.009	1.832	1.823
10K	7.08	0.065	5.47	5.41	0.0016	2.29	2.2884
20K	7.08	0.296	6.17	6.13	0.0004	2.6	2.5996
30K	7.08	0.198	6.06	6	0.0496	3.18	3.1304
40K	7.08	0.279	6.8	6.59	0.0002	2.8	2.7998
50K	7.08	0.113	6.28	6.3	0	2.51	2.51

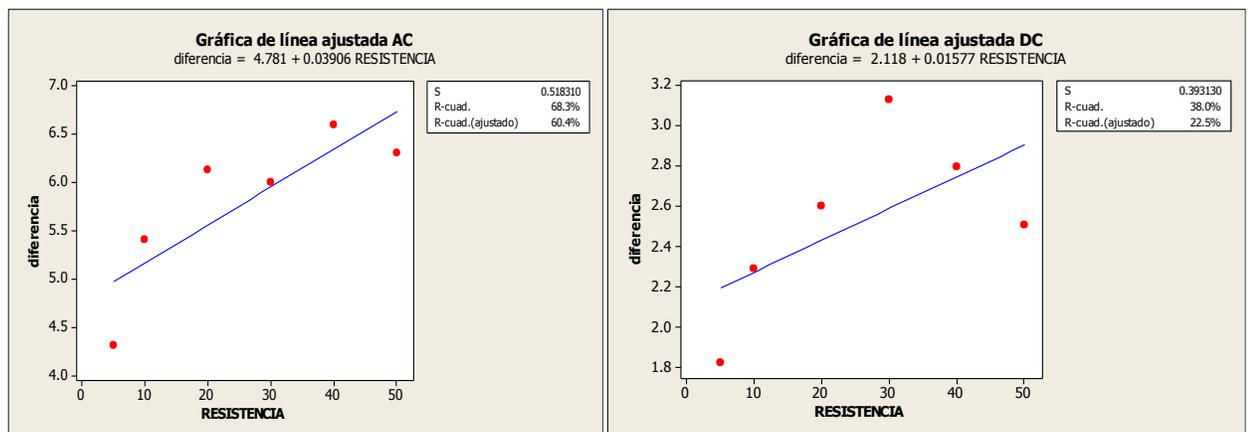
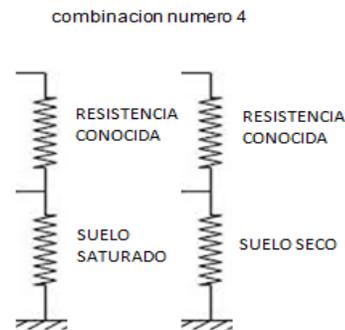


Figura E2: Gráfica de comportamiento para AC Y DC en la combinación 3

Resultados del ejercicio número 4, para el acondicionamiento del puente de Wheatstone, con resistencias conocidas.

Combinación 4



En el cuadro (E3) y Figura (E3) se muestran los resultados de la prueba para corriente alterna (AC) que va directamente en el sensor y corriente directa (DC).

Cuadro E3: Resultados de la prueba de la sensibilidad para AC y DC.

RESISTENCIA	corriente alterna				corriente directa		
	Vin	Vout1	Vout2	diferencia	Vout1	Vout2	diferencia
5K	6.01v	0.1036 v	2.391 v	2.283 v	0.0015 v	0.874 v	0.8725
10K	6.01	0.055	1.452	1.389	0.0001	0.516	0.5159
20K	6.01	0.0265	0.813	0.786	0	0.23	0.23
30K	6.01	0.0176	0.571	0.554	0	0.1364	0.1364
40K	6.01	0.0138	0.439	0.4254	0	0.0893	0.0893
50K	6.01	0.0109	0.3558	0.3522	0	0.0626	0.0626

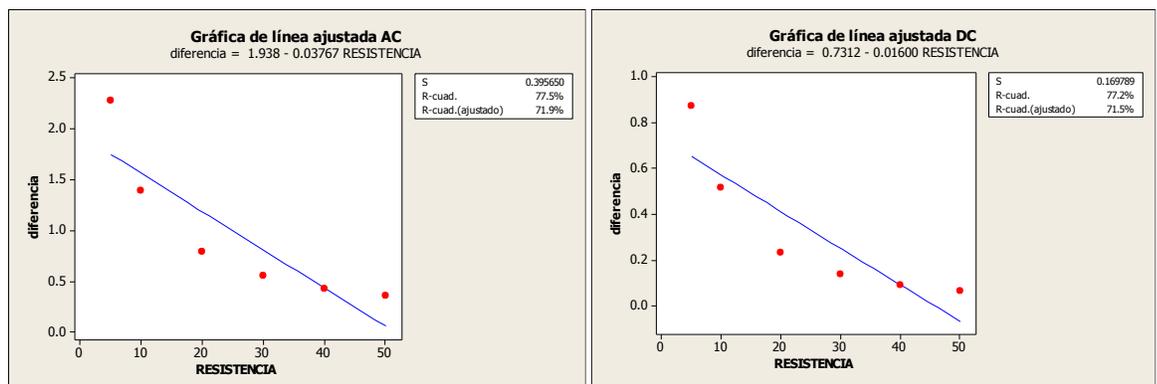


Figura E3: Gráfica de comportamiento para AC Y DC en la combinación 4

ANEXO F. Colocación, Pegado, y cableado de galgas

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 F1.



Figura F1 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 F2 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 f3.



Figura F3. 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 F4.



Figura F4. 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 F5.



Figura F5. 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 F6.

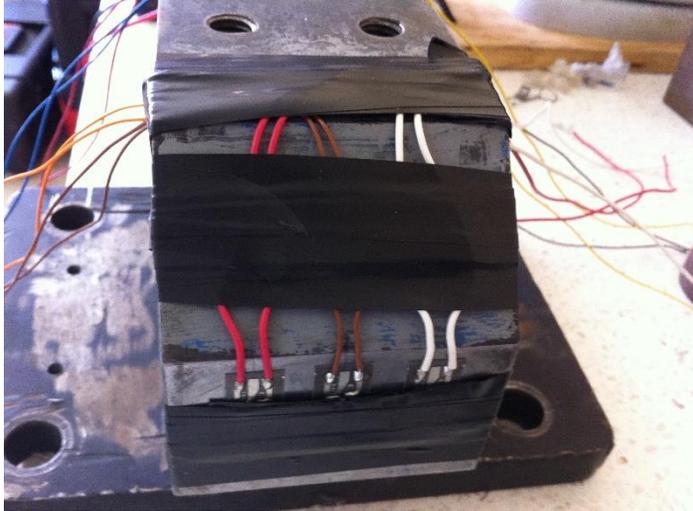


Figura F6 Sistema de cableado de los sensores octagonales

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 G. Nomenclatura

Ecuaciones 2.1-2.7:

dA = Diferencial de área.

L_x = Camino o ruta de cada filamento de corriente eléctrica.

R_x = Resistencia eléctrica de cada ruta.

R_t = Resistencia global de todas las rutas.

r = Resistividad del material

C.E. = Conductividad del material

I_t = Conducción; intensidad total de corriente que pasa de una placa a la otra.

V_t = Diferencia de potencial entre las placas.

I_t/V_t = Conductancia, la cual es el inverso de la resistencia o sea $1/R_t$

Ecuaciones 2.8:

p = Resistividad promedio a la profundidad (A) en ohm-m

a = Distancia entre electrodos en metros.

b = Profundidad de enterrado de los electrodos en metros.

R = Lectura del terreno en ohms.

Ecuaciones 2.9-2.13:

V_p = Velocidad de propagación de la onda

L = Distancia a la que viaja la onda

t = Tiempo requerido

c = Velocidad de la luz en el vacío

K = Constante dieléctrica

ϵ = Humedad volumétrica

Ecuaciones 2.14:

Z = Impedancia

R = Resistencia

Ecuaciones 2.15:

ε = Constante dieléctrica del agua

t = Temperatura

Ecuaciones 2.16:

M = Momento flexionante

F_x = Fuerza en x

F_y = Fuerza en y

R = Radio

Ecuaciones 2.17-2.22.

ϵ = Sensibilidad de la galga.

F = Fuerza (N)

r = Radio del ring (m)

b = Ancho del ring (m)

t = Espesor (m)

E = Módulo de elasticidad.

Ecuaciones 2.23:

ϵ = Deformación

L = Longitud original

dL = Cambio en longitud debido a la deformación

σ = Esfuerzo.

E = Módulo de elasticidad

Ecuación 2.24.

R = Resistencia sin deformación

ϵ = Deformación

L = Longitud original

dL = Cambio en longitud debido a la deformación

K = Número fijo proporcional

Ecuación 2.25.

ρ = Resistividad

L = Longitud.

A = Área de la sección

Ecuación 2.26.

V = Voltaje de salida esperado

U = Voltaje de excitación

n = Número de galgas activas

ε = Deformación
FG = Factor de galga
Gain = Ganancia

Ecuación 3.1

σ = Esfuerzo flexionante
 F = Fuerza (N)
 r = Radio del ring (m)
 b = Ancho del ring (m)
 t = Espesor (m)

Ecuación 3.2

F_s = Factor de seguridad
 σ_p = Esfuerzo ultimo del material
 σ_l = Esfuerzo calculado

Ecuación 3.3

ε_{90° = Sensibilidad de la galga.
 F = Fuerza (N)
 r = Radio del ring (m)
 b = Ancho del ring (m)
 t = Espesor (m)
 E = Módulo de elasticidad.

Ecuación 3.4-3.5

RG = Resistencia de ganancia
 Ω = Resistencia
G = Ganancia

Ecuación 3.6

R = Resistencia
C = Capacitor
F = Frecuencia

Ecuación 3.7

P = Presión

F = Fuerza obtenida del sensor

A = Área del cono.

Ecuación 3.8

ph = Peso húmedo

ps = Peso seco

Ecuación 4.1

Valor mínimo

Valor máximo

Media

Ecuación 4.2

Y = Humedad

a = Constante 1

Ln = Logaritmo natural

b = Constante 2

Ecuación 4.3

P= fuerza total de la herramienta

γ = densidad total

g= gravedad

d=profundidad

C=fuerza de cohesión del suelo

q= presión que actúa verticalmente en la superficie del suelo

W= anchura de la herramienta

N_γ , N_c y N_q = son factores que dependen no sólo de la fuerza de fricción del suelo, sino también de la geometría de la herramienta y la herramienta para las propiedades de resistencia del suelo