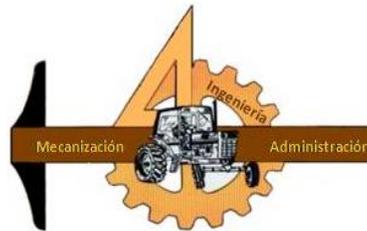




UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA

“ANTONIO NARRO”

DIVISIÓN DE INGENIERÍA



**EVALUACIÓN DE UN SENSOR DE HUMEDAD DE UN
SUELO BAJO CONDICIONES DE CAMPO**

POR:

LUCIANO VALDEZ RANGEL

TESIS

**Presentada como Requisito Parcial para
Obtener el Título de:**

INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Mayo del 2011

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA

“ANTONIO NARRO”

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA

**EVALUACIÓN DE UN SENSOR DE HUMEDAD DE UN
SUELO BAJO CONDICIONES DE CAMPO**

POR:

LUCIANO VALDEZ RANGEL

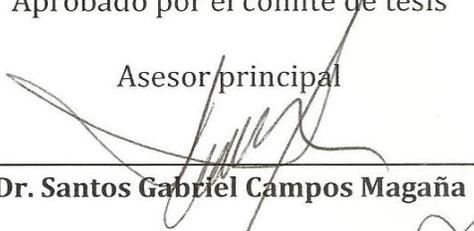
TESIS

Que Somete a Consideración del H. Jurado Examinador Como Requisito Parcial
para Obtener el Título de:

INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

Aprobado por el comité de tesis

Asesor principal



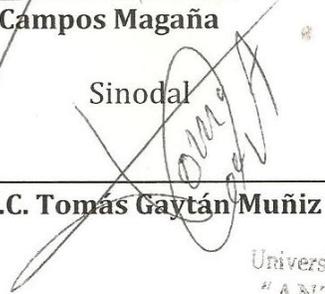
Dr. Santos Gabriel Campos Magaña

Sinodal



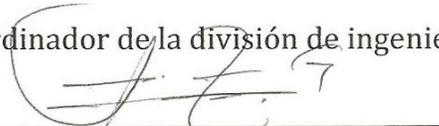
Dr. Martín Cadena Zapata

Sinodal



M.C. Tomás Gaytán Muñiz

Coordinador de la división de ingeniería



M.C. Luis Rodríguez Gutiérrez

Universidad Autónoma Agraria
“ANTONIO NARRO”



Coordinación de
Ingeniería

AGRADECIMIENTOS

*A **DIOS** Por darme la oportunidad de estar en esta vida y tener el deseo de superarme, por estar bien de salud y darme también una familia muy linda, gracias a él he podido alcanzar mis metas que me he propuesto y he concluido una etapa más.*

*A **MI “ALMA TERRA MATER”** Por haberme brindado la oportunidad de formar parte de esta institución, lo cual considero un privilegio y me siento orgulloso.*

*A **MI ASESOR** Dr. Santos Gabriel Campos Magaña por brindarme su confianza y su apoyo, gracias a su experiencia y conocimientos compartidos, he aprendido a manejar nuevas herramientas que han sido parte fundamental en este proyecto y me seguirán siendo útiles en el proceso de mi vida laboral, gracias por ser parte de este logro del cual me siento muy feliz.*

*AI **M.C. URIEL SERNA FERNANDEZ** Por ser un excelente maestro, un buen amigo y brindarme su amistad, sus conocimientos y su confianza, ya que gracias a sus consejos he tomado decisiones correctas en el transcurso de mi formación académica y de mi vida.*

*AI **M.C. ABEL ZAMARRIPA LEYVA** Por su confianza y orientación para encontrar la opción de emprender un nuevo proyecto de vida y preparación académica en mi “Alma Terra Mater”.*

*A mis compañeros de la carrera IMA generación CX por los momentos que pasamos en estos cuatro años y por demostrar compañerismo aprendiendo cosas unos de otros. A mis compañeros y amigos **Chuyito, Ezequiel, Maynor, Saúl, Chera, Fausto, Gato, Adelfo, Edelmar** 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 que compartimos juntos, nunca los olvidare.*

A todo el personal del departamento de maquinaria agrícola, ya que han colaborado brindándome los elementos necesarios en el proceso de mi formación académica.

*A la **M.C. B. Elizabeth de la Peña Casas, Ing. Juan Arredondo Valdes, Ing. Rosendo González Garza, Ing. José Juan del Valle Treviño, M.C. Tomás Gaytán Muñiz, Dr. Jesús R. Valenzuela García, Dr. Martín Cadena Zapata,** gracias por transmitirme cada unos de sus conocimientos durante mi carrera profesional.*

A mi familia por confiar en mí y acompañarme a lo largo de mi preparación académica apoyándome incondicionalmente, gracias por su apoyo ya que fue una razón mas para concluir satisfactoriamente esta etapa.

DEDICATORIA

PARA MI MADRE *Gracias Mami primero que nada por darme la vida, por apoyarme en lo que he decidido emprender, por esos consejos que me han servido muchísimo para enfrentar la vida, por aquellas palabras de ánimo, muchas gracias y recuerda que te quiero muchísimo.*

PARA MI PADRE *Muy en especial para ti papá, por tus consejos, por creer en mí, por tu apoyo incondicional, por la confianza; quiero decirte que te admiro y te quiero mucho por que has trabajado muchísimo para sacarnos adelante.*

PARA MI HERMOSA HERMANITA Y MIS HERMANOS

Sandra Lucero

Héctor Adán

José Luis

Raúl

A mi hermanita Sandra Lucero *“Mi Reynita” sabes hermanita te quiero mucho y me hace muy feliz el hecho de saber que tengo una hermanita, alegras cada momento de mi vida.*

A mi hermano Héctor Adán *Por estar ahí siempre a mi lado y por soportarme cuando andaba enojadillo jeje, te quiero mucho; gracias y échale ganas a todo lo que hagas y en la carrera que decidas iniciar.*

A mi hermano José Luis *“Mr. Pepo” gracias por apoyarme en todos los aspectos brother, se que siempre has estado ahí puesto y dispuesto para lo que se necesite, te lo agradezco de corazón, de antemano ya sabes que se te quiere mucho.*

A mi hermano Raúl *“Mr. Rulitos” Te admiro y te respeto muchísimo hermano eres como mi segundo padre, a ti te dedico este logro; siempre has sido ese alguien que me a motivado y me a enseñado a echarle ganas en cada cosa que decida emprender, por la confianza que depositaste en mi y porque siempre buscaste la manera de apoyarme en todos lo aspectos para que sacara mi carrera satisfactoriamente, te quiero muchísimo hermano, le doy gracias a dios por darme la dicha de tener una familia con la cual cuento y me siento orgulloso de los logros que cada uno de ellos han logrado y logran.*

ÍNDICE DE CONTENIDO.

ÍNDICE DE FIGURAS	I
ÍNDICE DE CUADROS	III
RESUMEN	V
I INTRODUCCION	1
<i>1.1 Objetivos específicos</i>	2
<i>1.2 Hipótesis</i>	2
II REVISION DE LITERATURA	3
<i>2.1 Agricultura de precisión</i>	3
<i>2.2 Calidad de Suelos</i>	4
<i>2.3 Conductividad Eléctrica</i>	11
<i>2.4 Conductividad Eléctrica de un Suelo</i>	16
<i>2.5 Conductividad Eléctrica a Granel del Suelo (CEG)</i>	17
<i>2.6 Medida de la resistividad eléctrica del suelo</i>	22
<i>2.7 Determinación de humedad de un suelo</i>	24
<i>2.8 Eficacia de un Sensor de Capacitancia para Medir Simultáneamente Salinidad y Contenido Hídrico</i>	25
<i>2.9 Puente de impedancias adaptado, un método alternativo al TDR para la determinación de la humedad edáfica</i>	26
III MATERIALES Y MÉTODOS	28
<i>3.1 Determinación de la humedad del suelo</i>	28
<i>3.2 Método de determinación de humedad y capacidad de campo</i>	29
<i>3.3 Acondicionamiento de carro porta sensores para la determinación de humedad</i>	30

IV RESULTADOS.....32

V CONCLUSIONES.....47

VI BIBLIOGRAFIA.....48

VII ANEXOS.....51

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>2.1 Principales componentes de la calidad de suelo</i>	6
<i>2.2 Triángulo Moebius para las tres dimensiones implícitas en el concepto sostenibilidad</i> ...	8
<i>2.3 Enfoque para la definición de indicadores de calidad de suelo</i>	9
<i>2.4 Principio físico de la conductividad eléctrica</i>	14
<i>2.5 Resistividad y conductividad granel –ceg- del suelo Vs. Humedad</i>	17
<i>2.6 Conductividad granel-ceg- y resistividad de un suelo Vs. % de sales en la solución del mismo para una humedad constante del 15% p/p</i>	18
<i>2.7 Relación entre resistividad, conductividad y temperatura de un suelo con una humedad del 15.2%</i>	18
<i>2.8 Activímetro de HANNA Instruments (HI993310): para medir la conductividad eléctrica de una disolución (W) ó la actividad del suelo (S)</i>	22
<i>2.9 Método de Wenner para medir la conductividad eléctrica del suelo</i>	23
<i>2.10 Método Schlumberger para medir la conductividad eléctrica del suelo</i>	24
<i>2.11 Circuitos de puentes de impedancia y resistivo</i>	26
<i>3.1 Diagrama de circuito electrónico para determinar la capacitancia</i>	28
<i>3.2 Diseño de barra porta electrodos para prueba de humedad</i>	29
<i>3.3 Bastidor MCC 3/5/7 TECNOMEC S.A de C.V</i>	30
<i>3.4 Discos cortadores de residuos</i>	31
<i>4.1 Dibujo en solido del conjunto del carro porta sensores y los discos cortadores de residuos</i>	32
<i>4.2 Diagrama de circuito electrónico desarrollado para medir capacitancia</i>	33
<i>4.3 Equipo utilizado para la calibración del circuito de humedad</i>	35
<i>4.4 Línea de respuesta de calibración del circuito de humedad del suelo en (mv) con los 5 diferentes capacitores</i>	36
<i>4.5 Equipo para medir humedad del suelo bajo condiciones de laboratorio</i>	37
<i>4.6 Línea de respuesta de húmeda del suelo en (mv) con capacitor 224</i>	39

<i>4.7 Equipo utilizado para medir humedad del suelo, utilizando los discos cortadores de residuos a 30,35 Y 40 cm de distancia entre discos</i>	<i>40</i>
<i>4.8 Línea de respuesta de húmeda del suelo en (mv) con capacitor 224, discos a 30 cm...</i>	<i>42</i>
<i>4.9 Línea de respuesta de húmeda del suelo en (mv) con capacitor 224, discos a 35 cm...</i>	<i>44</i>
<i>4.10 Línea de respuesta de húmeda del suelo en (mv) con capacitor 224, discos a 40 cm..</i>	<i>46</i>

ÍNDICE DE CUADROS

<i>2.1 Conjunto de indicadores físicos, químicos y biológicos propuesto para monitorear los cambios que ocurren en el suelo.....</i>	<i>12</i>
<i>2.2 Valores de conductividad eléctrica en Micro Siemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) de algunas muestras típicas de soluciones acuosas.....</i>	<i>13</i>
<i>2.3 Parámetros para fertilizantes inorgánicos y orgánicos utilizados en fertirrigación.....</i>	<i>21</i>
<i>4.1 Cuadro de resultados de porcentaje de humedad de un suelo⁽¹⁾.....</i>	<i>34</i>
<i>4.2 Resultados en (mv) de la linealidad de los 4 capacitores empleados, tomando como referencia el capacitor de 220000 Nanofaradios.....</i>	<i>35</i>
<i>4.3 Análisis de varianza de la calibración del circuito de humedad del suelo en (mv) con los 4 diferentes capacitores.....</i>	<i>36</i>
<i>4.4 Resultados en (mv) obtenidos en laboratorio con 7 diferentes porcentajes de humedad del suelo, utilizando 5 diferentes capacitores.....</i>	<i>38</i>
<i>4.5 Resultados en (mv) obtenidos en laboratorio con 7 diferentes porcentajes de humedad del suelo, utilizando 5 diferentes capacitores.....</i>	<i>38</i>
<i>4.6 Análisis de varianza de húmeda del suelo en (mv) con el capacitor 224.....</i>	<i>39</i>
<i>4.7 Resultados en (mv) obtenidos con 4 diferentes porcentajes de humedad del suelo, utilizando los discos cortadores de residuos a 30 cm de distancia entre discos.....</i>	<i>40</i>
<i>4.8 Ecuaciones de humedad de suelo Vs voltaje obtenidas con el equipo de los discos cortadores de residuos a 30 cm de distancia entre discos.....</i>	<i>41</i>
<i>4.9 Análisis de varianza de humedad del suelo en (mv) con el capacitor 224.....</i>	<i>41</i>
<i>4.10 Resultados en (mv) obtenidos con 4 diferentes porcentajes de humedad del suelo, utilizando los discos cortadores de residuos a 35 cm de distancia entre discos.....</i>	<i>42</i>
<i>4.11 Ecuaciones de humedad de suelo Vs voltaje obtenidas con el equipo de los discos cortadores de residuos a 35 cm de distancia entre discos.....</i>	<i>43</i>

<i>4.12 Análisis de varianza de húmeda del suelo en (mv) con el capacitor 224.....</i>	<i>43</i>
<i>4.13 Resultados en (mv) obtenidos con 4 diferentes porcentajes de humedad del suelo, utilizando los discos cortadores de residuos a 40 cm de distancia entre discos.....</i>	<i>44</i>
<i>4.14 Ecuaciones de humedad de suelo Vs voltaje obtenidas con el equipo de los discos cortadores de residuos a 40 cm de distancia entre discos.....</i>	<i>45</i>
<i>4.15 Análisis de varianza de húmeda del suelo en (mv) con el capacitor 224.....</i>	<i>45</i>

RESUMEN

El presente trabajo de investigación fue desarrollado en “El Departamento de Maquinaria Agrícola de la UAAAN” y forma parte del proyecto titulado: “Desarrollo de equipos, sensores e instrumentos para agricultura de precisión y labranza de conservación” que dentro de sus objetivos destaca el desarrollo de equipo para la generación de mapas de conductividad eléctrica, resistencia al corte y penetración georeferenciados. Los objetivos que se consideraron en esta tesis, para lograr el objetivo del proyecto fueron, adecuar el tractor para la instalación del sistema de adquisición de datos, adecuar carro porta sensores para el montaje de electrodos en contacto con el suelo para medir la humedad del suelo, desarrollo de circuitos electrónicos para la determinación de humedad. La adecuación del tractor John Deere 6403, se considero que recibiera el sistema de adquisición de datos, computadora, así como la alimentación de energía (110v) para las mismas. Se adecuo el marco del equipo MCC 3/5/7 de la empresa TECNOMEC AGRÍCOLA S.A de C.V. como carro porta sensores incorporándole un sistema con gato hidráulico para controlar la profundidad desde 30 a 60cm. El Circuito electrónico evaluado fue el LM2907 para humedad del suelo. En la determinación de humedad del suelo bajo condiciones de laboratorio, la mejor respuesta se obtuvo empleando el capacitor de 224×10^{-4} Nanofaradios, obteniendo una línea de respuesta con una correlación del 87.0 %. Para la humedad del suelo utilizando los discos cortadores de residuos, empleando 5 diferentes capacitores y 3 distancias entre discos; en los resultados obtenidos la mejor respuesta se obtuvo con el Capacitor de 224×10^{-4} Nanofaradios a una distancia entre discos de 30 cm, obteniendo una línea de respuesta con una correlación del 94.2 %.

Palabras clave: Humedad de suelo, Sensores.

I INTRODUCCION

La Agricultura de precisión o manejo de sitio específico es la utilización de herramientas que permiten la obtención y análisis de datos georeferenciados, mejorando el diagnóstico, la toma de decisiones y la eficiencia en el uso de insumos así como una disminución sustantiva en la contaminación. A nivel mundial las oportunidades y riesgos actuales en la producción de alimentos está vinculada con: alta demanda mundial de alimentos (granos, carne, aceite, proteína, bioenergía); alta demanda y costo de petróleo y gas natural en todo el mundo (el gas natural es 90% del costo de la producción de amoníaco); aumento del área fertilizada en el mundo; deficiencias de nutrientes que limitan la producción de cultivos y forrajes así como altos índices de contaminación ambiental entre otros.

Una forma de contrarrestar estos efectos y corregir algunas de sus causas es mediante el manejo óptimo en la aplicación de insumos en la agricultura, para la aplicación de esta tecnología se requiere de una fase de diagnóstico previo de rendimiento, combinado con muestreo de ambientes a nivel de predio para determinar los factores limitantes de la producción así como su localización precisa para poder de ahí realizar las prescripciones en tiempo real y sitio específico de insumos. Se requiere para lo anterior contar con sistemas que se integren entre otros por Geoposicionador Diferencial con Aplicación en la Agricultura (AgDGPS), Sensores de ambientes, sistemas de Información Geográfica (SIG), así como equipos de dosificación variables de insumos.

A nivel mundial como un indicador existen alrededor de 20 países que han incorporado estos sistemas inteligentes y automatizados en la aplicación de insumos agrícolas, entre los que destacan Estados Unidos con 30 000 unidades de producción, Argentina con 1200, Brasil con 250, Reino Unido con 400, Paraguay con 4 y México con *Cero* unidades. Actualmente en la UAAAN no se cuenta con maquinaria ni equipos e instrumentos automatizados para docencia e investigación en mecanización para la agricultura de precisión.

Por tal motivo durante la convocatoria interna 2009, para proyectos de Investigación de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro fue presentado y autorizado un proyecto de investigación denominado:

“DESARROLLO DE EQUIPOS, SENSORES E INSTRUMENTOS PARA AGRICULTURA DE PRECISION Y LABRANZA DE CONSERVACION”.

Cuyos objetivos planteados fueron:

1. Fortalecer la enseñanza e investigación en agricultura de precisión.
2. Evaluación de calidad de equipos agrícolas de labranza de conservación.
3. Desarrollo de un Sistema de simulación de dosis variable de semillas.
4. Sistema de Dosificación Variable de Semillas en tiempo real.
5. Desarrollo de equipo para la Generación de Mapas de Conductividad Eléctrica, resistencia al corte y penetración georeferenciados.
6. Desarrollo de un Sistema Integral para el Monitoreo de Fuerzas en Equipos de Labranza.

El presente trabajo de tesis se circunscribe en el objetivo número 5, con los siguientes objetivos específicos:

1.1 *Objetivos específicos*

- a) Evaluar un sensor que permita en forma dinámica registrar la humedad del suelo.
- b) Integración de circuitos eléctricos para medir permisividad eléctrica de suelos agrícolas.
- c) Acoplamiento de sistemas electrónicos-sensores en contacto con el suelo registro en tiempo real.
- d) Evaluación de sensores bajo condiciones de campo y elaboración de mapas de prescripción.

1.2 *Hipótesis*

Es factible desarrollar un sensor que nos permita determinar la humedad del suelo en forma dinámica bajo condiciones de campo sin que exista una diferencia mayor del 10% con respecto a los instrumentos de laboratorio.

II REVISION DE LITERATURA

2.1 Agricultura de precisión

Bongiovanni *et al.*, (2006), menciona que la agricultura de precisión 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, satélites, e imágenes satelitales y sistema de información geográfica(SIG) para estimar y evaluar dichas variaciones. Menciona que los equipos geoposicionadores están integrados de un sistema de navegación y orientación cuyo funcionamiento es el de procesar y recibir información la cual proviene de los satélites ubicados a diferentes alturas sobre la superficie terrestre, cada satélite de GPS emite continuamente dos códigos de diferentes formatos digitales. Los datos son transmitidos por medio de señales de radio. Uno de los códigos está reservado para los militares y no puede ser captado por los receptores GPS civiles. El otro código, (de uso civil) transmite dos series de datos conocidas como ALMANAQUE y EFEMERIDES. Los datos ofrecidos por el almanaque y las efemérides informan sobre el estado operativo de funcionamiento del satélite, su situación orbital, la fecha, hora. http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_Informaci%C3%B3n_Geogr%C3%BA.

Bolstad, P. (2005), menciona que el sistema de información geográfica (GIS) está integrado por un hardware y un software los cuales capturan y almacenan, manipulan, analizan y despliegan información geográficamente referenciada.

En la página <http://www.soildoctor.com/Abrate.PDF>, se describe un sistema de monitoreo de la conductividad eléctrica denominado “Soil doctor” que al principio fue utilizado para dirigir el manejo de nitrógeno solo en maíz, elaborando los datos así obtenidos en combinación con una serie de parámetros prefijados en la configuración introducida al sistema por el operador, según la estrategia de aplicación o siembra que decidan, los datos pueden ser guardados en una tarjeta y ya después pueden ser relacionados con un GPS para posteriormente mapear y así estudiar los lotes.

El equipo está integrado por un sistema de Adquisición y procesamiento de datos y determinación de dosis. En relación al desarrollo y perfeccionamiento de métodos para el sensoramiento de la conductividad eléctrica (CE), Corwin y Rhoades (1981), indica que 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 con parámetros que correlacionan con la salinidad y otras propiedades del suelo.

Lide D.R., (1992), menciona que en general, el flujo de electricidad a través de un conductor es debido a un transporte de electrones. Según la forma de llevarse a cabo este transporte, los conductores eléctricos pueden ser de dos tipos: conductores metálicos o electrónicos y conductores iónicos o electrolíticos. La conductividad eléctrica (CE) de una disolución puede definirse como la aptitud de ésta para transmitir la corriente eléctrica, y dependerá, además del voltaje aplicado, del tipo, número, carga y movilidad de los iones presentes y de la viscosidad del medio.

En la página <http://usuarios.lycos.es/zandoli/web3/Capacidad%20de%20intercambio%20cationico.html>, se describe que los sitios de intercambio de cationes, son encontrados principalmente sobre la superficie de la arcilla y la Materia Orgánica (MO). El rango normal de CE en suelos debería ser desde menos de 3 miliequivalentes (meq)/100g para suelos arenosos bajos en MO, a más de 25 meq/100g para suelos con alto contenido en ciertos tipos de arcilla y MO. La MO desarrollará una mayor CE en suelos con pH cercano al neutro, que en condiciones ácidas. Adiciones de un material orgánico, incrementarán ligeramente la CE en el suelo. La CE del suelo puede disminuir con el tiempo, a través de la descomposición de la MO y la acidificación.

2.2 Calidad de Suelos

La calidad y la salud del suelo son conceptos equivalentes, no siempre considerados sinónimos, Doran y Parkin, (1994).

La calidad debe interpretarse como la utilidad del suelo para un propósito específico en una escala amplia de tiempo, Carter *et al.*, (1997). El estado de las propiedades dinámicas del suelo como contenido de materia orgánica, diversidad de organismos, o productos microbianos en un tiempo particular constituye la salud del suelo, Romig *et al.*, (1995). La preocupación por la calidad del suelo no es nueva, Lowdermilk, (1953); Doran *et al.*, 1996; Karlen *et al.*, 1997; Singer y Ewing, (2000). En el pasado, este concepto fue equiparado con el de productividad agrícola por la poca diferenciación que se hacía entre tierras y suelo. Tierras de buena calidad eran aquéllas que permitían maximizar la producción y minimizar la erosión. Para clasificarlas se generaron sistemas basados en esas ideas, Doran y Parkin, (1994). Esos incluían términos como tierras agrícolas de primera calidad. El concepto de calidad del suelo ha estado asociado con el de sostenibilidad, pero éste último tiene varias acepciones.

Para Budd, (1992), es el número de individuos que se pueden mantener en un área dada en cambio, para Buol, (1995), el uso del suelo se debe de basar en la capacidad de éste para proporcionar elementos esenciales, pues éstos son finitos y limitan, por ende, la productividad. La calidad del suelo, ha sido percibida de muchas formas desde que este concepto se popularizó en la década de los 80's, Karlen *et al.*, (1997), y se le ha relacionado con la capacidad del suelo para funcionar; incluye atributos como fertilidad, productividad potencial, sostenibilidad y calidad ambiental. Simultáneamente, calidad del suelo es un instrumento que sirve para comprender la utilidad y salud de este recurso.

Como se muestra en la Fig. **(2.1)**, el término calidad del suelo se empezó a acotar al reconocer las funciones del suelo: (1) promover la productividad del sistema sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas (productividad biológica sostenible); (2) atenuar contaminantes ambientales y patógenos (calidad ambiental); y (3) favorecer la salud de plantas, animales y humanos, Doran y Parkin, (1994); Karlen *et al.*, (1997). Al desarrollar este concepto se ha considerado que el suelo es el substrato básico para las plantas; capta, retiene y emite agua; y es un filtro ambiental efectivo, Larson y Pierce, (1991); Buol, (1995).

En consecuencia, este concepto refleja la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites del ecosistema del cual forma parte y con el que interactúa, Parr *et al.*, (1992).



Fig. (2.1). Principales componentes de la calidad de suelo.

Para Gregorich *et al.*, (1994), la calidad de suelo es una medida de su capacidad para funcionar adecuadamente con relación a un uso específico. Arshad y Coen, (1992), le dieron a este concepto una connotación más ecológica; la definieron como su capacidad para aceptar, almacenar y reciclar agua, minerales y energía para la producción de cultivos, preservando un ambiente sano. Las definiciones más recientes de calidad del suelo se basan en la multifuncionalidad del suelo y no sólo en un uso específico, pero este concepto continúa evolucionando, Singer y Ewing, (2000). Estas definiciones fueron sintetizadas por el Comité para la Salud del Suelo de la Soil Science Society of América, Karlen *et al.*, (1997), como la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sostener la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat.

Según Sojka y Upchurch, (1999), las definiciones de calidad del suelo son contextuales y subjetivas. Estos autores consideran necesaria la unificación de criterios sobre su significado, importancia y medición, como lo hacen, Singer y Ewing, (2000).

Su principal objeción es que ninguna evaluación de la calidad edáfica considera, de manera objetiva y simultánea, los resultados potenciales, positivos o negativos, de todos los indicadores empleados en la evaluación de los elementos de la multifuncionalidad (producción, sostenibilidad y calidad ambiental, etc.).

A menudo, se reconocen sólo los resultados positivos de ciertos indicadores, tales como el contenido de materia orgánica y la cantidad de lombrices, o sólo los negativos de aspectos como la salinidad o la compactación, Sojka y Upchurch, (1999).

Así, la materia orgánica proporciona muchos beneficios al suelo, pero también puede tener impactos negativos ambientales y agrícolas, rara vez considerados en la evaluación de la calidad edáfica. Al incrementarse la materia orgánica se deben aumentar las dosis de aplicación de muchos pesticidas, lo que conlleva obvias repercusiones negativas económicas, ambientales y de salud. Otro ejemplo de efectos negativos, escasamente reconocidos en el contexto de la calidad edáfica, es la cantidad de lombrices. Por una parte, estos invertebrados benefician de manera importante la producción agrícola, pero por otra, incrementan el flujo y movimiento rápido de contaminantes aplicados superficialmente hacia el subsuelo y actúan como vectores de enfermedades vegetales, Sojka y Upchurch, (1999).

A pesar de la preocupación creciente acerca de la degradación del suelo, de la disminución en su calidad y de su impacto en el bienestar de la humanidad y el ambiente, aún no hay criterios universales para evaluar los cambios en la calidad del suelo, Arshad y Coen, (1992). Para hacer operativo este concepto, es preciso contar con variables que puedan servir para evaluar la condición del suelo. Estas variables se conocen como indicadores, pues representan una condición y conllevan información acerca de los cambios o tendencias de esa condición, Dumanski *et al.*, (1998). Según Adriaanse, (1993), los indicadores son instrumentos de análisis que permiten simplificar, cuantificar y comunicar fenómenos complejos. Tales indicadores se aplican en muchos campos del conocimiento (economía, salud, recursos naturales, etc.). Los indicadores de calidad del suelo pueden ser propiedades físicas, químicas y biológicas, o procesos que ocurren en él SQI, (1996).

Para Dumanski *et al.*, (1998), dichos indicadores no podrían ser un grupo seleccionado *ad hoc* para cada situación particular, sino que deben ser los mismos en todos los casos, con el propósito de facilitar y hacer válidas las comparaciones a nivel nacional e internacional. Algunos autores sostienen que los indicadores que se empleen deben reflejar las principales restricciones del suelo, en congruencia con la función o las funciones principales que se evalúan, como lo han sugerido, Astier *et al.*, (2002); Hünne Meyer *et al.*, (1997), establecieron que los indicadores deberían permitir:

- Analizar la situación actual e identificar los puntos críticos con respecto al desarrollo sostenible.
- Analizar los posibles impactos antes de una intervención.
- Monitorear el impacto de las intervenciones entrópicas.
- Ayudar a determinar si el uso del recurso es sostenible.

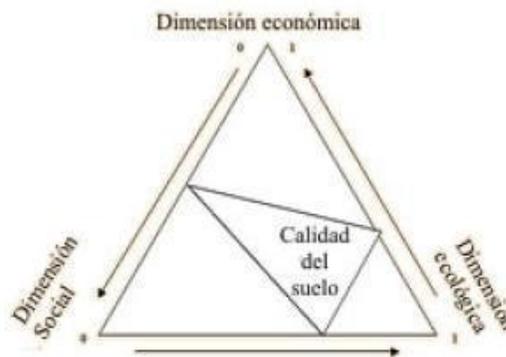


Fig. (2.2). Triángulo Moebius para las tres dimensiones implícitas en el concepto sostenibilidad.

Hay tres elementos implícitos en el concepto sostenibilidad: la dimensión económica, la social y la ecológica, Goodland y Daly, (1996); Hünne Meyer *et al.*, (1997), mostrado en la Fig. (2.2). La sostenibilidad ecológica se refiere a las características fundamentales para la supervivencia que deben mantener los ecosistemas a través del tiempo en cuanto a componentes e interacciones.

La sostenibilidad económica implica la producción a una rentabilidad razonable y estable a través del tiempo, lo cual haga atractivo continuar con dicho manejo. Y la sostenibilidad social aspira a que la forma de manejo permita a la organización social un grado aceptable de satisfacción de sus necesidades. El manejo sostenible puede, por lo tanto, significar distintas cosas según la función principal del recurso o del momento histórico en que se hace una evaluación.

El desarrollo agrícola sostenible abarca las tres vertientes. No parece posible optimizar simultáneamente cada uno de los tres componentes de la definición anterior, lo más conveniente es definir ciertos límites aceptables para cada uno de ellos y optimizar primero uno, procurando que la intensidad de los otros dos se ubique en el límite aceptable para ese momento y condiciones particulares. Con el transcurso del tiempo, los tres objetivos deberían ir acercándose a los óptimos ideales para cada uno de los tres componentes.

La Fig. (2.3) muestra un enfoque para la definición de indicadores propuesto por Hünne Meyer *et al.*, (1997), este enfoque hace que los indicadores de calidad del suelo puedan considerarse dinámicos en el tiempo. Por lo que para cada momento histórico o situación particular habría que buscar un equilibrio entre los tres objetivos del desarrollo sostenible.

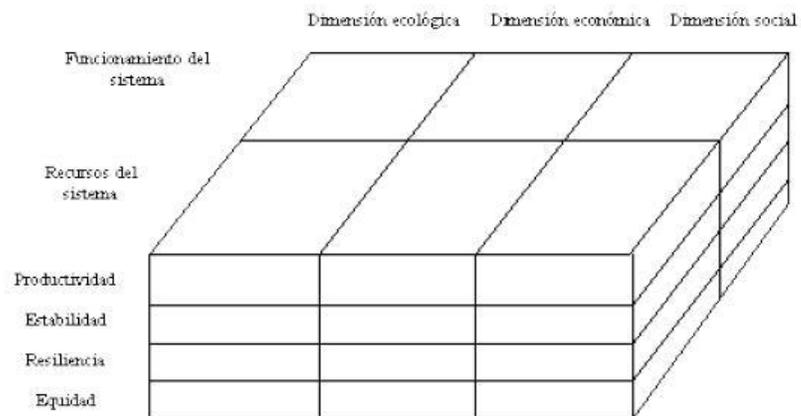


Fig. (2.3). Enfoque para la definición de indicadores de calidad de suelo.

Condiciones que deben cumplir los indicadores de calidad del suelo, para que las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo sean consideradas indicadores de calidad, deben cubrir las siguientes condiciones, Doran y Parkin, (1994):

- a) Describir los procesos del ecosistema.
- b) Integrar propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.
- c) Reflejar los atributos de sostenibilidad que se quieren medir.
- d) Ser sensitivas a variaciones de clima y manejo.
- e) Ser accesibles a muchos usuarios y aplicables a condiciones de campo.
- f) Ser reproducibles.
- g) Ser fáciles de entender.
- h) Ser sensitivas a los cambios en el suelo que ocurren como resultado de la degradación antropogénica.
- i) Cuando sea posible, ser componentes de una base de datos del suelo ya existente.

En virtud de que existen muchas propiedades alternativas para evaluar la calidad del suelo, Larson y Pierce, (1991); Doran y Parkin, (1994) y Seybold *et al.*, (1997), plantearon un conjunto mínimo de propiedades del suelo para que sean usadas como indicadores para evaluar los cambios que ocurren en el suelo con respecto al tiempo cuadro **(2.1)**.

Los indicadores disponibles para evaluar la calidad de suelo pueden variar de localidad a localidad dependiendo del tipo y uso, función y factores de formación del suelo, Arshad y Coen, (1992). La identificación efectiva de indicadores apropiados para evaluar la calidad del suelo, depende del objetivo que debe considerar los múltiples componentes de la función del suelo, en particular el productivo y el ambiental. La identificación es compleja por la multiplicidad de factores químicos, físicos y biológicos que controlan los procesos biogeoquímicos y su variación en intensidad con respecto al tiempo y espacio, Doran *et al.*, (1996).

Las características físicas del suelo son una parte necesaria en la evaluación de la calidad de este recurso porque no se pueden mejorar fácilmente, Singer y Ewing, (2000). Las propiedades físicas que pueden ser utilizadas como indicadores de la calidad del suelo cuadro **(2.1)**, son aquellas que reflejan la manera en que este recurso acepta, retiene y transmite agua a las plantas, así como las limitaciones que se pueden encontrar en el crecimiento de las raíces, la emergencia de las plántulas, la infiltración o el movimiento del agua dentro del perfil y que además estén relacionadas con el arreglo de las partículas y los poros.

La estructura, densidad aparente, estabilidad de agregados, infiltración, profundidad del suelo superficial, capacidad de almacenamiento del agua y conductividad hidráulica saturada, son las características físicas del suelo que se han propuesto como indicadores de su calidad. Los indicadores químicos mostrados en el cuadro **(2.1)**, se refieren a condiciones de este tipo que afectan las relaciones entre el suelo y la planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo, la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas y microorganismos, SQI, (1996). Algunos indicadores son la disponibilidad de nutrientes, carbono orgánico total, carbono orgánico lábil, pH, conductividad eléctrica, capacidad de adsorción de fosfatos, capacidad de intercambio de cationes, cambios en la materia orgánica, nitrógeno total y nitrógeno mineralizable.

2.3 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 corriente 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.

Cuadro (2.1). Conjunto de indicadores físicos, químicos y biológicos propuesto para monitorear los cambios que ocurren en el suelo.

Propiedad	Relación con la condición y función del suelo	Valores o unidades relevantes ecológicamente; comparaciones para evaluación
Físicas		
Textura	Retención y transporte de agua y compuestos químicos; erosión del suelo	% de arena, limo y arcilla; pérdida del sitio o posición del paisaje
Profundidad del suelo, suelo superficial y raíces	Estima la productividad potencial y la erosión	cm o m
Infiltración y densidad aparente	Potencial de lavado; productividad y erosividad	minutos/2.5 cm de agua y g/cm ³
Capacidad de retención de agua	Relación con la retención de agua, transporte, y erosividad; humedad aprovechable, textura y materia orgánica	% (cm ³ /cm ³), cm de humedad aprovechable/30 cm; intensidad de precipitación
Químicas		
Materia orgánica (N y C total)	Define la fertilidad del suelo; estabilidad; erosión	Kg de C o N ha ⁻¹
pH	Define la actividad química y biológica	comparación entre los límites superiores e inferiores para la actividad vegetal y microbiana
Conductividad eléctrica	Define la actividad vegetal y microbiana	dSm ⁻¹ ; comparación entre los límites superiores e inferiores para la actividad vegetal y microbiana
P, N, y K extractables	Nutrientes disponibles para la planta, pérdida potencial de N; productividad e indicadores de la calidad ambiental	Kg ha ⁻¹ ; niveles suficientes para el desarrollo de los cultivos
Biológicas		
C y N de la biomasa microbiana	Potencial microbiano catalítico y depósito para el C y N, cambios tempranos de los efectos del manejo sobre la materia orgánica	Kg de N o C ha ⁻¹ relativo al C y N total o CO ₂ producidos
Respiración, contenido de humedad y temperatura	Mide la actividad microbiana; estima la actividad de la biomasa	Kg de C ha ⁻¹ d ⁻¹ relativo a la actividad de la biomasa microbiana; pérdida de C contra entrada al reservorio total de C
N potencialmente mineralizable	Productividad del suelo y suministro potencial de N	Kg de N ha ⁻¹ d ⁻¹ relativo al contenido de C y N total

Cuadro (2.2). Valores de conductividad eléctrica en micro Siemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) de algunas muestras típicas de soluciones acuosas.

	Conductividad a 25°C
Agua Ultra-pura	0.05 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Agua de alimentación a calderas	1 a 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Agua potable	50 a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Solución de Suelo	0.5 - 2.5 mS/cm
Agua de mar	53.0 mS/cm
5 % NaOH	223.0 mS/cm

La conductividad eléctrica es el recíproco de la resistencia CA en ohms, 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 cm^3 sino con electrodos de diferente tamaño, rectangulares, cilíndricos o de diversa forma; por lo cual al hacer la medición, en lugar de la conductividad, se mide la conductancia (I_t/V_t), la cual al ser multiplicada por una constante (k) de cada celda en particular, se transforma en la conductividad en S/cm. En la Fig. (2.4), se muestra el principio físico de la conductividad eléctrica.

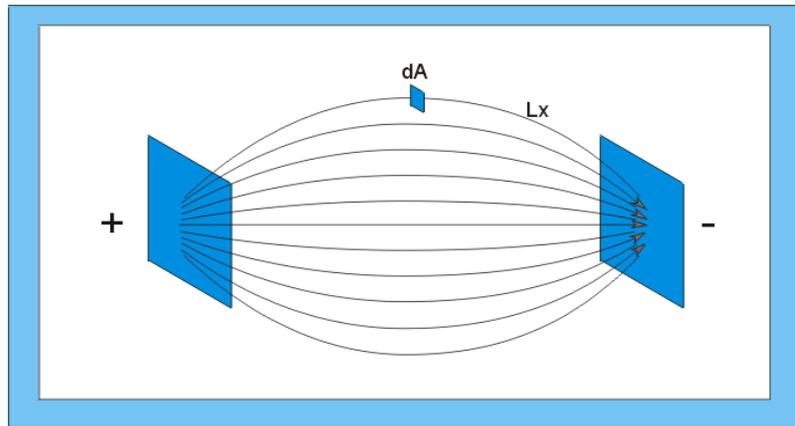


Fig. (2.4). Principio físico de la conductividad eléctrica.

Donde:

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 $1/R_t$

Ecuación 2.1

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_{x_1}} + \frac{1}{R_{x_2}} + \frac{1}{R_{x_3}} + \dots + \frac{1}{R_{x_n}}$$

Ecuación 2.2
$$R_x = \frac{r L_x}{dA}$$

De donde:

Ecuación 2.3
$$\frac{1}{R_t} = \frac{dA}{r} \left(\frac{1}{L_{x_1}} + \frac{1}{L_{x_2}} + \frac{1}{L_{x_3}} + \dots + \frac{1}{L_{x_n}} \right)$$

Ecuación 2.4
$$\frac{I_t}{V_t} = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{r} \int \left(\frac{dA}{L_x} \right)$$

Por definición:

Ecuación 2.5
$$C.E. = \frac{1}{r}$$

Donde:

Ecuación 2.6
$$C.E. = \frac{1}{R_{t_x}} \left(\int \left\langle \frac{dA}{L_x} \right\rangle \right)^{-1} = \frac{I_t}{V_t} \left(\int \left\langle \frac{dA}{L_x} \right\rangle \right)^{-1}$$

En esta última ecuación, I_t es la conducción eléctrica, I_t/V_t 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.

2.4 Conductividad Eléctrica de un Suelo

Cuando se habla de conductividad eléctrica de un suelo, usualmente se hace referencia a la conductividad eléctrica de su extracto de saturación y es determinada en un medio líquido. Se supone, aunque esto aun no ha sido demostrado, que dicha conductividad corresponde a la conductividad eléctrica del líquido intersticial del suelo. Esta última aseveración adolece de una falla. Para determinar la conductividad eléctrica de un suelo es necesario agregarle más agua y esta última contribuye a diluir el contenido de sales de la solución intersticial, rebajando su conductividad original.

El valor de la conductividad eléctrica en el extracto de equilibrio a capacidad de campo, puede ser mayor o menor que el del extracto de saturación, dependiendo de qué tan saturado de sales está el interior de los terrones del suelo. Este tipo de extracto al igual que el obtenido mediante el uso de sondas de succión tiende a reflejar mas el contenido de sales externo a los terrones del suelo mientras que el extracto de saturación incorpora, promedia y homogeniza la totalidad del suelo. Cuando un suelo es “nuevo” y se empieza a fertilizar, el interior de los terrones, siempre es más pobre en nutrientes y por ende más baja su conductividad que la de la solución nutritiva que se está aplicando.

Con el paso del tiempo, el suelo se va saturando de nutrientes y el interior de los terrones empieza a ser más rico que el exterior. Estas diferencias hacen que la interpretación de un extracto de saturación a capacidad de campo deba ser realizada cuidadosamente teniendo en cuenta estos factores.

2.5 Conductividad Eléctrica a Granel del Suelo (CEG)

Hasta aquí hemos hablado de la conductividad eléctrica del suelo medida en algún tipo de extracto líquido. Ahora vamos a hablar de la Conductividad Eléctrica medida directamente en el suelo, considerado este, como un medio poroso parcialmente saturado con agua y con algún contenido de sales disueltas. Esta es la conductividad que se denomina conductividad eléctrica a granel (Bulk Conductivity), en lo sucesivo C.E.G. La ecuación que define la CEG, es exactamente la misma que define la CE general de cualquier medio. En este caso el medio es directamente el suelo. Como la conducción eléctrica de un suelo se realiza a través de la fase líquida ya que los poros llenos de aire no conducen la corriente eléctrica, entonces la conducción dependerá del volumen de los poros llenos de fase líquida.

A medida que se agota la fase líquida se hacen menores los caminos por donde puede ser conducida la corriente eléctrica, entonces la conducción dependerá del contenido de humedad del suelo. La siguiente grafica ilustra esta relación.

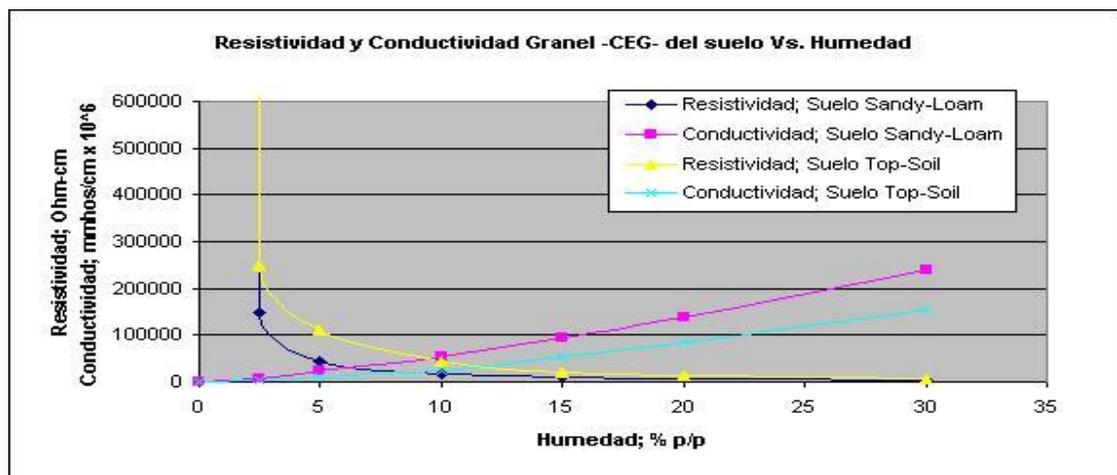


Fig. (2.5). Resistividad y conductividad granel –CEG- del suelo Vs. humedad.

Por otro lado, mientras más conductiva sea la fase líquida, mayor será la conductividad granel del suelo. Para un cierto contenido de humedad, la conductividad granel dependerá del contenido de sales en la solución intersticial.

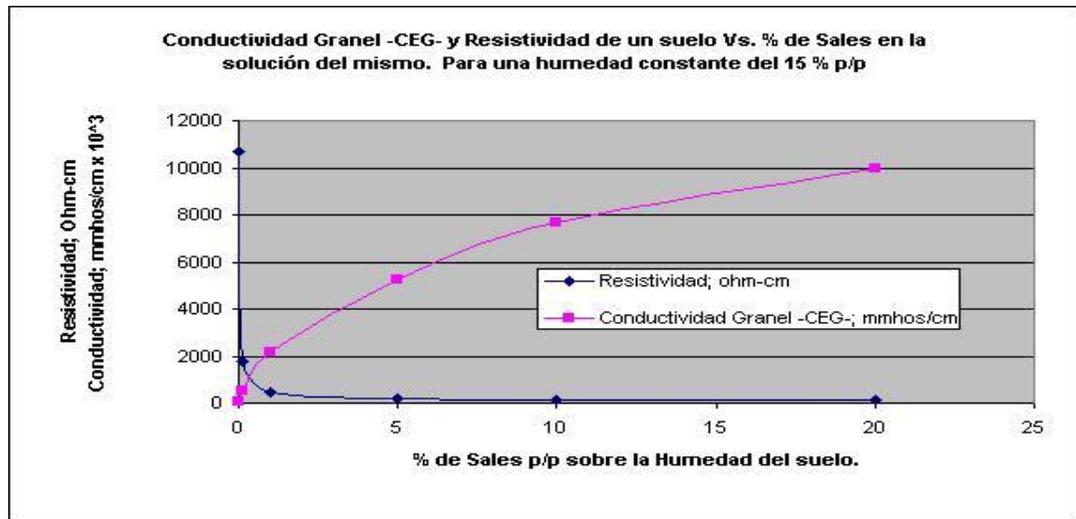


Fig. (2.6). Conductividad granel-CEG- y resistividad de un suelo Vs. % de sales en la solución del mismo. Para una humedad constante del 15% p/p.

Adicionalmente a lo anterior, es sabido que la conductividad eléctrica de cualquier medio aumenta con la temperatura. Esto es debido a la mayor movilidad iónica. Este efecto puede verse en la gráfica siguiente:

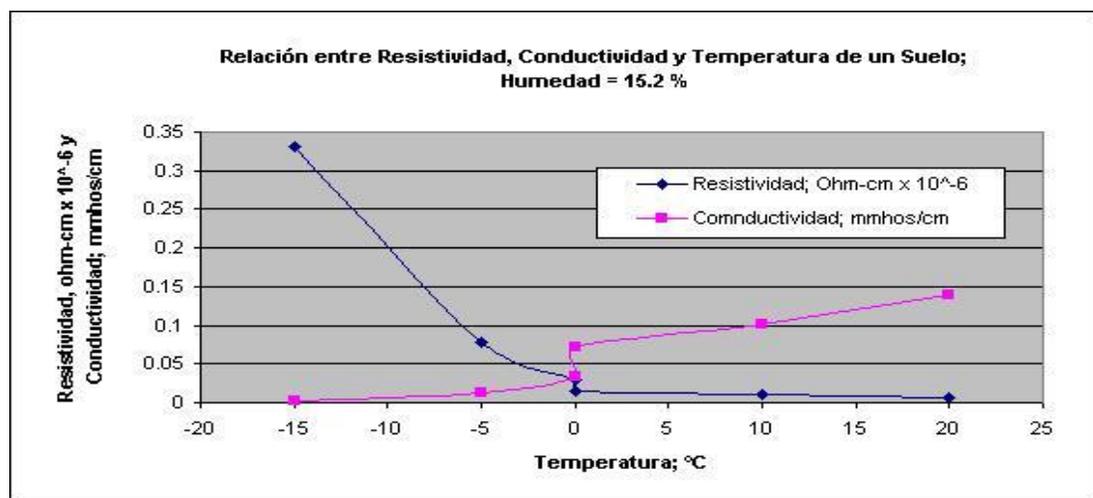


Fig. (2.7). Relación entre resistividad, conductividad y temperatura de un suelo con una humedad del 15.2%.

Este efecto sin embargo es menor que el efecto de la humedad. Como puede verse en las anteriores gráficas, la variación de la conductividad entre 10 y 20 % de humedad, es casi del 300 %, mientras que la variación de la conductividad cuando la temperatura del suelo varía entre 10 °C y 20 °C es tan solo del 40 %. Usualmente la diferencia entre la T. máxima y la T. mínima a 10 cm de profundidad es inferior a 10 °C.

<http://www.sws.uiuc.edu/warm>; <http://climate.umn.edu/>, de lo anterior se desprende que la CEG es una medida que depende fundamentalmente del contenido de humedad del suelo y del contenido de sales disueltas en dicha humedad. También depende secundariamente de otros factores tales como temperatura, tipo de suelo, cantidad y clase de arcillas, porcentaje de saturación de bases del complejo de cambio, etc. De los anteriores factores, los únicos que varían en el corto plazo son la humedad y la conductividad de la solución intersticial, permaneciendo los demás relativamente constantes.

En la mayoría de los cultivos intensivos, el proceso de disminución de humedad del suelo o sustrato, se debe a la absorción activa de agua por las raíces de las plantas y concomitantemente de iones disueltos, así que la conductividad de la solución intersticial no varía demasiado durante este proceso.

Cuando la conductividad de la solución intersticial se hace permanecer lo más constante posible, como es el caso de los cultivos tecnificados, en los cuales se controla dicha conductividad mediante el uso de sondas de succión, la CEG se convierte en un parámetro que en el corto plazo solamente depende de la humedad, así que:

$$CEG = K_s \times f (\% \text{ volumétrico de humedad}) \times f (\text{C.E. intersticial}) \times K_c.$$

En donde:

K_c = Constante de celda.

K_s = Constante que depende del tipo de suelo o sustrato.

C.E. Intersticial = Aproximadamente constante.

En la anterior ecuación, el término $K_s \times f$ (% volumétrico de humedad) $\times f$ (C.E. intersticial) es la conductancia del suelo comprendido entre los electrodos de medida y es igual a I_t/V_t . Aunque es frecuente ver expresada la conductividad de una disolución en $S \cdot m^{-1}$ o sus derivados ($dS \cdot m^{-1}$, $mS \cdot cm^{-1}$ ó $\mu S \cdot cm^{-1}$), porque los equipos de medida la muestran como la magnitud que han hallado, en trabajos científicos suelen aparecer dos conceptos nuevos: la conductividad molar y la conductividad equivalente.

En las variables anteriormente citadas, la conductividad se relaciona con la concentración molar o equivalente (equivalente gramo) del electrolito que participa en la disolución; en este caso, la conductividad molar se expresa como:

Ecuación 2.7

$$\lambda = \frac{K}{C}$$

Donde:

λ = Conductividad molar ($S \cdot m^{-2} \cdot mol^{-1}$).

K = Conductividad específica ($S \cdot m^{-1}$).

C = Concentración ($moles \cdot m^{-3}$).

Continuando con el mismo razonamiento, la conductividad equivalente-gramo se expresa como:

Ecuación 2.8

$$\lambda_{eq} = \frac{1000 - K}{C_{eq}}$$

Donde:

λ_{eq} = Conductividad equivalente molar ($S \cdot cm^{-1} \cdot eq \cdot g^{-1} \cdot L^{-1}$).

K = Conductividad específica ($S \cdot cm^{-1}$).

C_{eq} = Concentración (equivalentes-gramo $\cdot L^{-1}$).

Desde el punto de vista práctico, resulta interesante estimar la concentración de un determinado electrolito fuerte, en una disolución acuosa, a partir de su conductividad eléctrica. El cuadro (2.3) muestra algunos parámetros para los fertilizantes inorgánicos y orgánicos más comúnmente utilizados en fertirrigación.

Parámetros (a, b) y coeficiente de determinación (r^2) de la ecuación lineal ($y = a + b \cdot x$) que relaciona la concentración (y, mM) de una disolución acuosa de fertilizantes comúnmente utilizados en fertirrigación, con su conductividad eléctrica (x, $mS \cdot cm^{-1}$). A modo de ejemplo, en la última columna aparece la conductividad eléctrica que debería alcanzar una disolución acuosa de un fertilizante para conseguir una concentración de $5 \text{ meq} \cdot L^{-1}$.

Cuadro (2.3). Parámetros para fertilizantes inorgánicos y orgánicos utilizados en fertirrigación.

FERTILIZANTE ⁽¹⁾	$y = a + b \cdot x$			CE_{25} ($mS \cdot cm^{-1}$)
	a	b	r^2	
KNO ₃	0.1117	0.0493	0.9992	26.4
Mg(NO ₃) ₂	0.1782	0.1020	0.9992	16.3
NH ₄ NO ₃	0.1260	0.0515	0.9997	23.4
Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	0.1813	0.1303	0.9980	15.8
KCl	0.1256	0.0255	0.9999	23.7
K ₂ SO ₄	0.1191	0.0512	0.9995	24.7
MgSO ₄ · 7H ₂ O	0.1288	0.1853	0.9946	21.8
H ₃ PO ₄	0.0703	0.1010	0.9909	-
H ₂ SO ₄	0.2896	0.2335	0.9982	9.6

HANNA Instruments (HI) ha desarrollado un equipo (HI993310) que, a partir de un circuito electrónico común, permite medir tanto la conductividad eléctrica (CE) de una disolución (W), como la actividad eléctrica del suelo (A). La Fig. (2.8) muestra el aspecto que adopta el equipo cuando tiene conectada la sonda para medir la actividad eléctrica del suelo.



Fig. (2.8). Activímetro de HANNA Instruments (HI993310) para medir la conductividad eléctrica de una disolución (W) ó la actividad del suelo (S).

2.6 Medida de la resistividad eléctrica del suelo

Método de Frank Wenner.

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 Fig. (2.9).

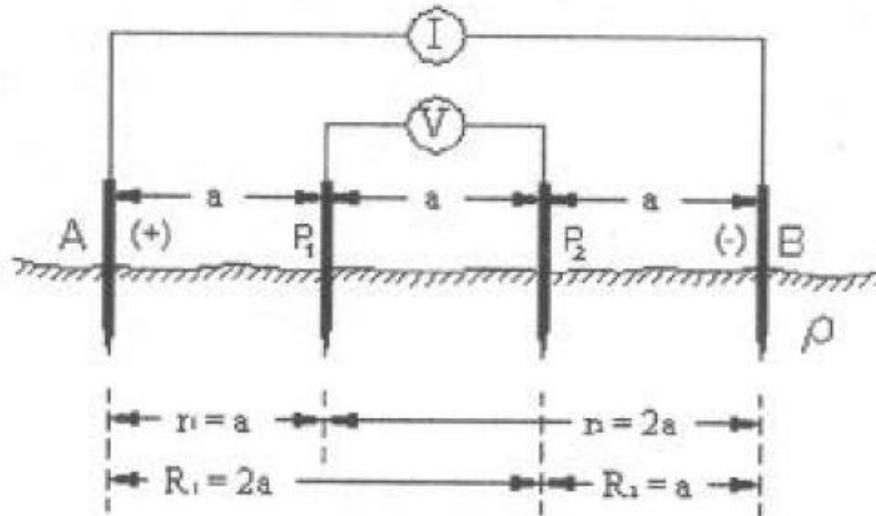


Fig. (2.9). Método de Wenner para medir la conductividad eléctrica del suelo.

Siendo su resistividad:

Ecuación 2.9
$$\rho = 2\pi \frac{v}{I} \left[\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right]^{-1} = 2\pi \left[\frac{Va}{I} \right] = 2\pi Ra$$

Método de Schlumberger

En este método los cuatro electrodos se ubican en una línea recta y la distancia de los electrodos detectores de potencia P1 y P2 que permanecen fijos es mucho menor que los electrodos inyectores de corriente A y B, que son los que se trasladan Fig. (2.10).

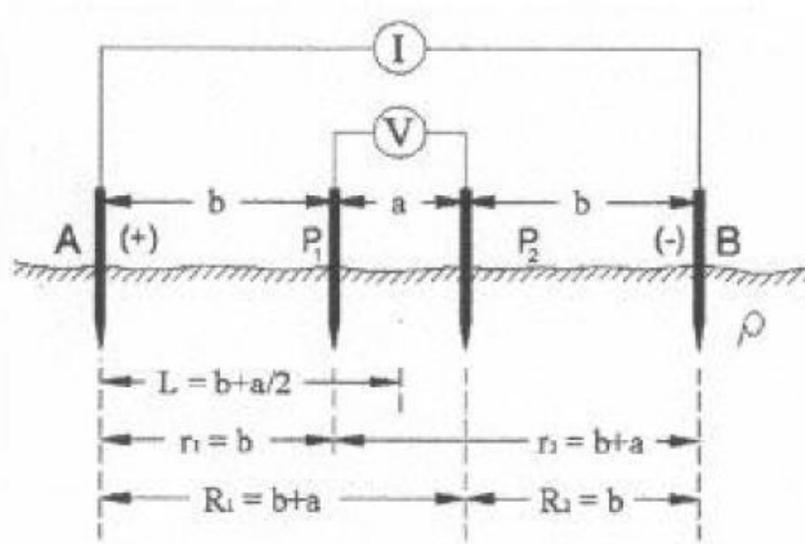


Fig. (2.10). Método Schlumberger para medir la conductividad eléctrica del suelo.

Siendo su resistividad.

Ecuación 2.10

$$\rho = 2\pi \frac{v}{I} \left[\frac{1}{b} - \frac{1}{b+a} + \frac{1}{a} \right]^{-1} = 4\pi R b \left[\frac{b+a}{a} \right]$$

2.7 Determinación de humedad de un suelo

La determinación del contenido de agua en el suelo o cualquier otro substrato, es de gran importancia en muchas aplicaciones científicas e industriales; tales como la agricultura, medio ambiente, construcción, industria alimentaria, ecología, hidrología y meteorología, entre otras. Con el objeto de conocer los procesos de humectación y desecación 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, coste moderado y volumen de medida reducido con el fin de obtener una resolución espacial óptima (por ejemplo, medición de humedad en raíces de plantas). Además el sensor debía permitir su utilización en suelos con un alto contenido en sales tales como los oasis de los desiertos o los suelos enarenados de cultivos bajo plástico.

Presentamos un método alternativo al TDR (Time Domain Reflectometry) para la determinación de la humedad volumétrica en el suelo. La técnica del puente de impedancias adaptado (SBIB) permite separar parte real e imaginaria de la constante dieléctrica para la determinación de la humedad volumétrica y conductividad eléctrica, respectivamente. De esta manera es posible su utilización en suelos muy salinos donde el TDR suele acarrear problemas. Presenta otras ventajas adicionales tales como la corrección de la medida de humedad frente a la temperatura del suelo y un costo reducido.

2.8 Eficacia de un 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 constituyen un método alternativo para determinar el contenido hídrico en la zona no saturada, por ser instrumentos no contaminantes, de fácil manejo y de coste 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 obtenidos 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.

2.9 El puente de impedancias adaptado, es un método alternativo al TDR para la determinación de la humedad edáfica

El funcionamiento de este circuito se muestra en la Fig. (2.11a), este es equivalente al de una balanza y se utiliza para detectar desequilibrios entre las impedancias R_1 y R_2 . Cuando $R_1=R_2$ se dice que el puente está equilibrado (la señal de desequilibrio del puente V_{12} es = 0).

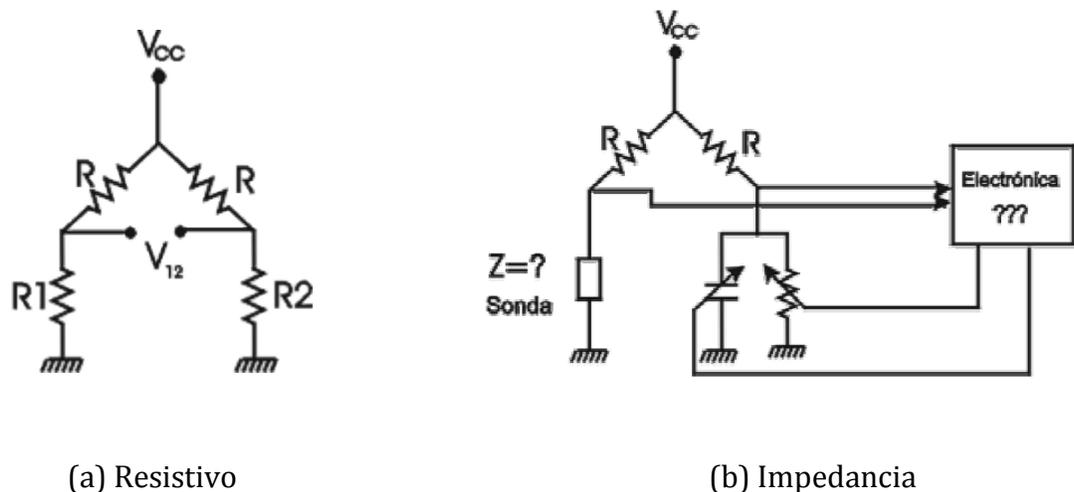


Fig. (2.11). Circuitos de puentes de impedancia y resistivo.

En la Fig. (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 50 MHz, de acuerdo con el autor 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 300 Hz. 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. 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%.

III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Determinación de la humedad del suelo.

Para la determinación de la humedad del suelo se construyó un dispositivo de tipo electrónico que permitió medir la humedad del suelo. Se empleó un circuito integrado C.I. LM2907, que permitió medir capacitancias hasta de $10^4 \mu\text{F}$. En la Fig. (3.1) se muestra el diagrama electrónico de circuito a construir y evaluar.

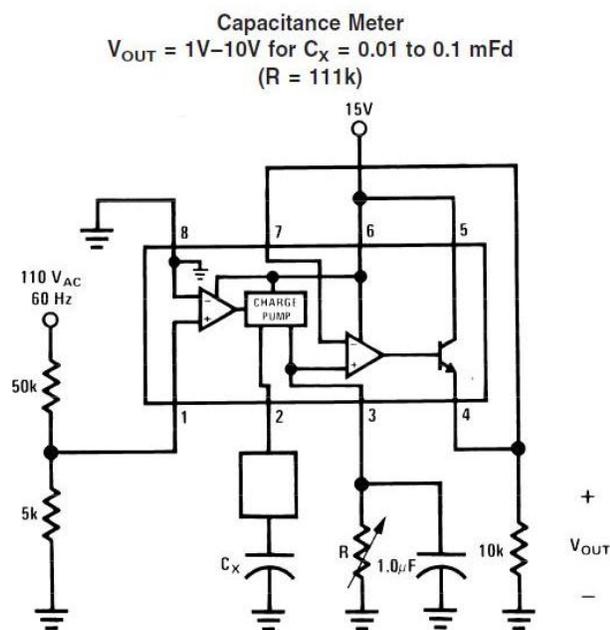


Fig. (3.1). Diagrama de circuito electrónico para determinar la capacitancia.

3.2 Método de determinación de humedad y capacidad de campo

Para la determinación de humedad primero se tuvo que sacar la capacidad de campo la cual se realizo en cuatro recipientes con la misma cantidad de agua que de suelo los cuales se dejaron drenar por 24hrs se pesaron y se metieron a la estufa por 24 hrs a (100 ° C) y se volvieron a pesar. Después se determino la humedad con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ humedad} = \left(\frac{psh - pss}{pss} \right) \times 100$$

Donde:

psh = Peso de suelo húmedo.

pss = Peso de suelo seco.

Para medir la capacitancia del suelo, se humedeció este con siete niveles de humedad tomando como límite superior la capacidad de campo y como Límite inferior 5% de humedad. Cada nivel de humedad se aplico a 5 kg en una charola de plástico con una superficie de 13.5 cm x 21.5 cm, mezclando el suelo y el agua en forma uniforme. La medición de la humedad del suelo se hizo empleando electrodos con arreglos como se muestra en la Fig. (3.2).

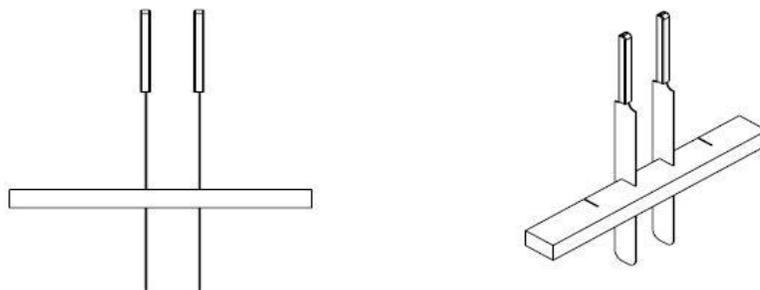


Fig. (3.2). Diseño de barra porta electrodos para prueba de humedad.

3.3 Acondicionamiento de carro porta sensores para la determinación de humedad del suelo.

Esto se realizo mediante el empleo de 4 discos cortadores de residuos (diámetro 52 cm) como electrodos. Para el almacenamiento de información se empleara un sistema de adquisición de datos integrado por un convertidor analógico digital (Daq Book 200) y acondicionadores de señales (dbk34a).

En el carro porta sensores se empleara el bastidor del Subsuelo MCC 3/ 5/ 7 donado por la compañía TECNOMECH S.A de C.V. mostrado en la Fig. (3.3). Se modificara el bastidor anterior a un tipo de carro porta sensores semi remolcado que permita soportar momentos torsionales hasta de 10 KN-m. Con ruedas controladoras de profundidad hasta de 60 cm. El ancho de la barra del porta sensor fue de 2.1m.



Fig. (3.3). Bastidor MCC 3/ 5/ 7.TECNOMECH S.A de C.V.

Las placas que se utilizaran para medir la capacitancia serán los discos cortadores de residuos trabajando a una profundidad de 10 cm en el suelo Fig. (3.4). Los niveles de voltaje aplicados de referencia serán los mismos que se requieran bajo condiciones de laboratorio. Se variaran las distancias entre placas para determinar cuáles son las apropiadas, para que nos den lecturas similares a las obtenidas bajo condiciones de laboratorio. Otra variable será el porcentaje de humedad en el suelo.



Fig. (3.4). Discos cortadores de residuos.

IV RESULTADOS

En la Fig. (4.1) se muestran en solido el conjunto del carro porta sensores elaborado en el software Solidworks Premium 2010, indicando los diferentes componentes para el control de profundidad, así como los arreglos de los discos cortadores de residuos a ser empleados en la evaluación en campo. En la figura antes mencionada, se muestran los principales elementos considerados para la determinación tanto de humedad del suelo como conductividad eléctrica.

1. Carro porta sensores.
2. Cilindro hidráulico para el control de profundidad.
3. Discos cortadores de residuos (electrodos).

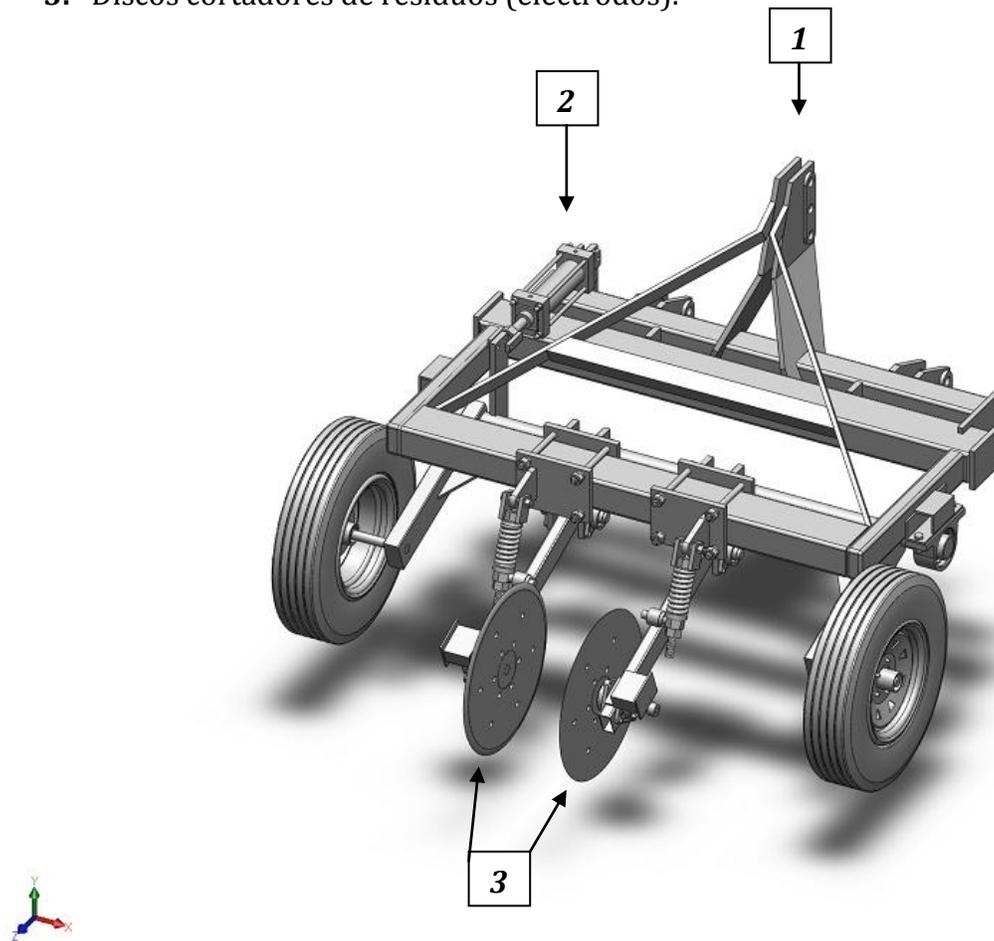
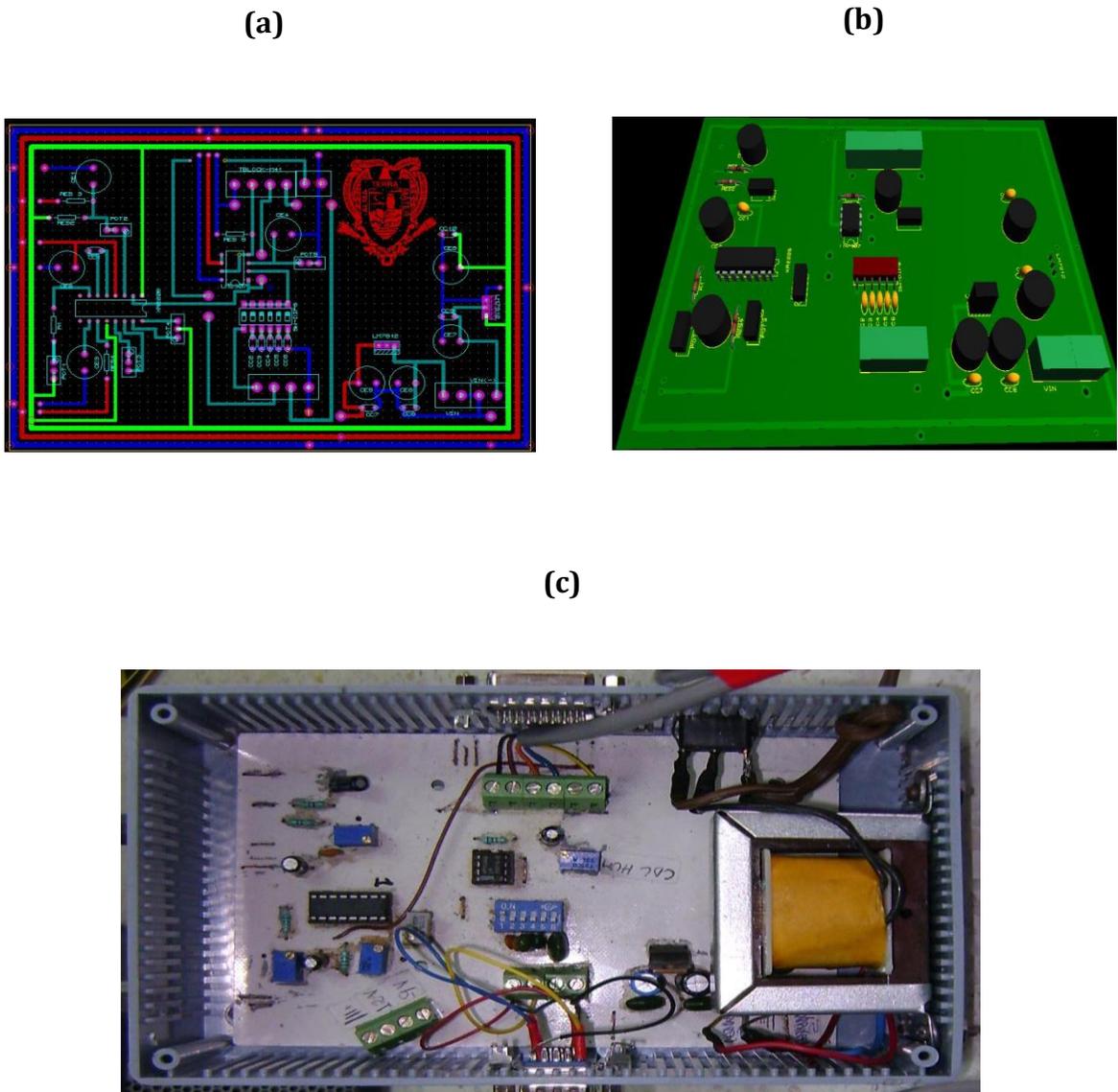


Fig. (4.1). Dibujo en solido del conjunto del carro porta sensores y los discos cortadores de residuos.

Para lograr los objetivos planteados se construyeron circuitos electrónicos, los cuales se muestran en la Fig. (4.2), estos fueron elaborados en Ares 7 professional (proteus). A continuación se muestran tanto los diagramas en 3D (b), esquemático (a) y real (c) del equipo electrónico para medir la capacitancia tomando como base el LM2907, cuyas características se encuentran en los anexos C.

Fig. (4.2). Diagrama de circuito electrónico desarrollado para medir capacitancia.



Para la obtención del porcentaje de humedad y capacidad de campo se realizaron 7 repeticiones, en el cuadro **(4.1)** se muestra en la columna (G) el porcentaje de humedad con el suelo de textura migajón arcilloso⁽¹⁾ con el que se realizó la determinación del rangos de humedad cuyo promedio de humedad fue de 39.8%.

Cuadro **(4.1)**. Cuadro de resultados de porcentaje de humedad de un suelo ⁽¹⁾.

A	B	C	D	E	F	G
1	85.7	187.3	148.2	101.6	62.5	38.5
2	86.4	191.9	147.5	105.5	61.1	42.1
3	84.4	186.5	151.5	102.1	67.1	34.3
4	85.5	191.2	191.2	154.3	105.7	34.9
5	85.8	136.1	116.1	50.3	30.3	39.76
6	87.2	136.9	116.6	49.7	29.4	40.85
7	87.6	135.4	116.3	47.8	28.7	39.96

(1) Textura: arcilla 36.6 %, limo 37.4%, arena 26% suelo migajón arcilloso

Las columnas indican lo siguiente:

- A.** Número de recipiente.
- B.** Peso del recipiente en gramos.
- C.** Peso drenada el agua en gramos.
- D.** Peso del suelo después de estufa en gramos.
- E.** Peso húmedo en gramos.
- F.** Peso seco en gramos.
- G.** % de humedad en gramos.

En la Fig. (4.3) se muestran los equipos empleados donde se llevo a cabo la calibración del circuito de humedad con los diferentes capacitores seleccionados para obtener la linealidad del instrumento.

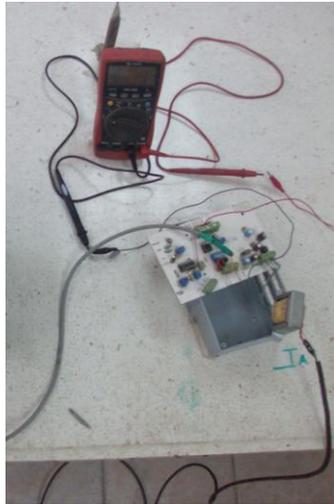


Fig. (4.3). Equipo utilizado para la calibración del circuito de humedad.

En el cuadro (4.2) se muestran los resultados de linealidad de los 4 capacitores empleados, tomando como referencia el capacitor de 220000 Nanofaradios. El análisis de varianza de la regresión mostrado, en el cuadro (4.3) nos indica una buena correlación de ($R-Sq = 96.9 \%$) la ecuación con los diferentes capacitores seleccionados. En la Fig. (4.4) se muestra la línea de respuesta.

Cuadro (4.2). Resultados en (mv) de la linealidad de los 4 capacitores empleados, tomando como referencia el capacitor de 220000 Nanofaradios.

Calibración del circuito de humedad	
Capacitor (Nanofaradios)	Voltaje (mv)
220000	8996
10000	2046
1000	217,3
150	34,5

Cuadro (4.3). Análisis de varianza de la calibración del circuito de humedad del suelo en (mv) con los 4 diferentes capacitores.

Fuente	GL	Ss	Ms	F	P
Regresión	1	3,40656E+10	3,40656E+10	63,21	0,015
Error	2	1,07787E+09	5,38935E+08		
Total	3	3,51434E+10			

GL.- Grados de libertad, Ss.- Suma de cuadrados, Ms.- Cuadrado medio, F.- factor F, P.-Probabilidad

La ecuación de regresión es:

$$\text{Capacitor} = - 13609 + 25,29 \text{ Voltaje (mv)}$$

$$S = 23215,0 \quad R\text{-Sq.} = 96,9\% \quad R\text{-Sq.}(\text{adj}) = 95,4\%$$

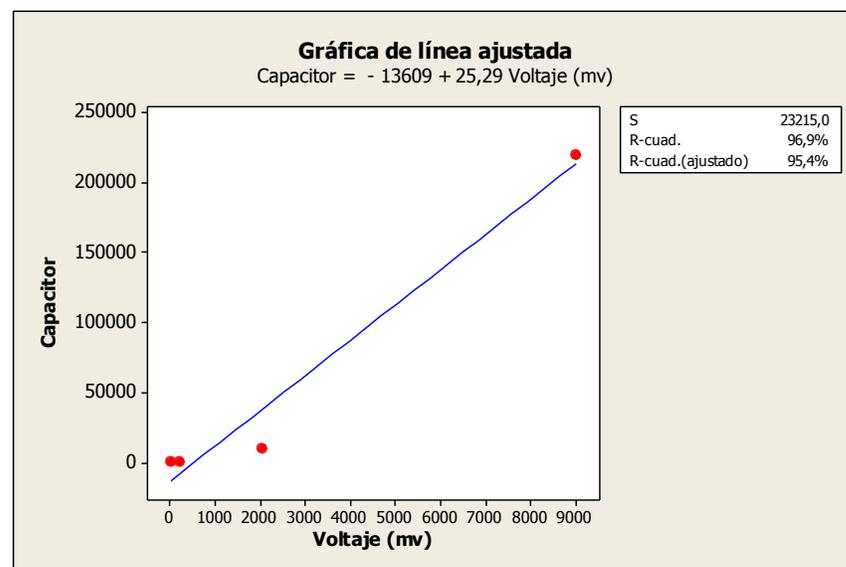


Fig. (4.4). Línea de respuesta de calibración del circuito de humedad del suelo en (mv) con los 4 diferentes capacitores.

En la Fig. (4.5) se muestran tanto los equipos empleados como el recipiente con suelo ⁽¹⁾ donde se llevo a cabo la determinación de humedad en (mv) bajo condiciones de laboratorio con los diferentes porcentajes de humedad y capacitores seleccionados.



(1) Textura: arcilla 36.6 %, limo37.4%, arena26% suelo migajón arcilloso

Fig. (4.5). Equipo utilizado para medir humedad del suelo bajo condiciones de laboratorio.

En el cuadro (4.4) se muestran los resultados de humedad en un suelo ⁽¹⁾ obtenidos bajo condiciones de laboratorio con 7 diferentes porcentajes de humedad utilizando 5 diferentes capacitores. La cantidad de tierra ⁽¹⁾ empleada para todas las evaluaciones bajo laboratorio fue de 5 Kg.

Cuadro (4.4). Resultados en (mv) obtenidos en laboratorio con 7 diferentes porcentajes de humedad del suelo, utilizando 5 diferentes capacitores.

% de Humedad	Capacitor 151	Capacitor 102	Capacitor 103	Capacitor 224	Capacitor 334
	Voltaje (mv)				
10	26,8	151,4	1322	7490	7530
15	27,1	203,6	1905	7830	7700
20	35,1	209,1	2049	8110	8340
25	36,7	219,1	2060	8640	8470
30	37,9	233,2	2064	8800	8670
35	35,9	235,2	2179	8800	8660
40	39,5	238,1	2235	8890	8890

(1) Textura: arcilla 36.6 %, limo37.4%, arena26% suelo migajón arcilloso

En el cuadro (4.5) se muestran el cuadro de ecuaciones obtenidas bajo condiciones de laboratorio con 7 diferentes porcentajes de humedad del suelo, utilizando 5 diferentes capacitores.

Cuadro (4.5). Ecuaciones de humedad de suelo Vs voltaje obtenidas bajo condiciones de laboratorio.

Capacitor (Nanofaradios)	Ecuación de regresión	R-sq	R-sq(adj)
150	Capacitor 151 = 21,87 + 0,4550 % de humedad	71,0%	65,2%
1000	Capacitor 102 = 162,1 + 2,071 % de humedad	55,7%	46,9%
10000	Capacitor 103 = 1438 + 22,56 % de humedad	56,5%	47,8%
220000	Capacitor 224 = 7185 + 46,64 % de humedad	87,0%	84,4%
330000	Capacitor 334 = 7223 + 44,00 % de humedad	85,0%	82,0%

(1) Textura: arcilla 36.6 %, limo37.4%, arena26% suelo migajón arcilloso

El análisis de varianza de la regresión mostrado en el cuadro (4.6), nos indica una correlación (R-Sq= 87.0 %) de la ecuación con los diferentes niveles de humedad del suelo y capacitores seleccionados. En la Fig. (4.6) se muestra la línea de respuesta.

Cuadro (4.6). Análisis de varianza de húmeda del suelo en (mv) con el capacitor 224.

Fuente	GL	Ss	Ms	F	P
Regresión	1	1522889	1522889	33,49	0,002
Error	5	227396	45479		
Total	6	1750286			

GL.-Grados de libertad, Ss.- Suma de cuadrados, Ms.- Cuadrado medio, F.- factor F, P.-Probabilidad

La ecuación de regresión es:

Capacitor 224 = 7185 + 46,64 % de humedad

S = 213,259 R-Sq. = 87,0% R-Sq. (adj) = 84,4%

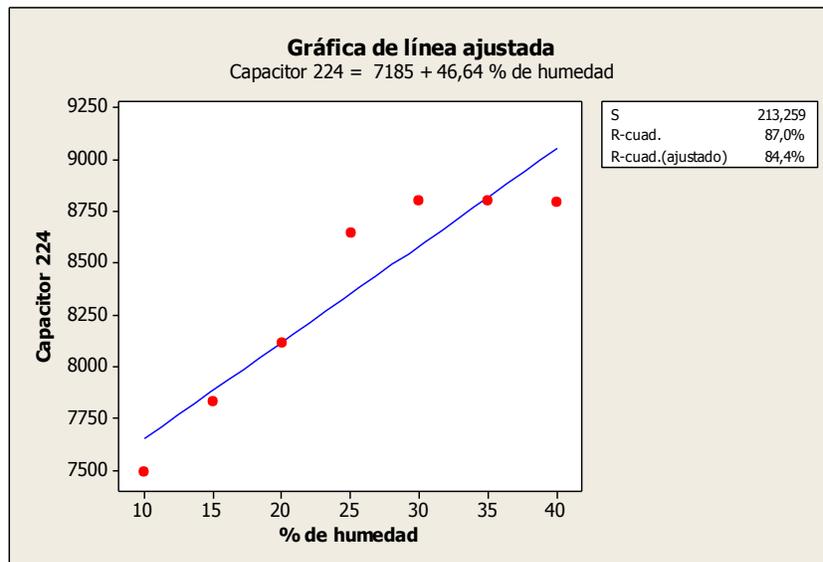


Fig. (4.6). Línea de respuesta de húmeda del suelo en (mv) con el capacitor 224.



(1) Textura: arcilla 36.6 %, limo37.4%, arena26% suelo migajón arcilloso

Fig. (4.7). Equipo utilizado para medir humedad del suelo ⁽¹⁾, utilizando los discos cortadores de residuos a 30, 35 Y 40 cm de distancia entre discos.

En el cuadro (4.7) se muestran los resultados de humedad en un suelo ⁽¹⁾, utilizando los discos cortadores de residuos como electrodos a 30 cm de distancia entre discos; con 4 diferentes porcentajes de humedad, utilizando 5 diferentes capacitores. La cantidad de tierra ⁽¹⁾ empleada para todas las evaluaciones realizadas con el equipo de los discos cortadores de residuos fue de 40 kg.

Cuadro (4.7). Resultados en (mv) obtenidos con 4 diferentes porcentajes de humedad del suelo, utilizando los discos cortadores de residuos a 30 cm de distancia entre discos.

% de Humedad	Capacitor 151	Capacitor 102	Capacitor 103	Capacitor 224	Capacitor 334
	Voltaje (mv)				
10	32,3	198,9	1850	8310	8010
20	32,7	202	1980	8510	8500
30	30,8	191,5	1816	8900	8820
40	31,4	195,4	1852	8970	8920

(1) Textura: arcilla 36.6 %, limo37.4%, arena26% suelo migajón arcilloso

En el cuadro **(4.8)** se muestra el cuadro de ecuaciones obtenidas con 4 diferentes porcentajes de humedad del suelo, utilizando los discos cortadores de residuos a 30 cm de distancia entre discos con 5 diferentes capacitores.

Cuadro **(4.8)**. Ecuaciones de humedad de suelo Vs voltaje obtenidas con el equipo de los discos cortadores de residuos a 30 cm de distancia entre discos.

Capacitor (Nanofaradios)	Ecuación de regresión	R-sq	R- sq(adj)
150	Capacitor 151 = 32,95 - 0,0460 % de humedad	47,7%	21,5%
1000	Capacitor 102 = 202,2 - 0,2100 % de humedad	35,9%	3,9%
10000	Capacitor 103 = 1914 - 1,580 % de humedad	8,0%	0,0%
220000	Capacitor 224 = 8080 + 23,70 % de humedad	94,2%	91,3%
330000	Capacitor 334 = 7800 + 30,50 % de humedad	92,4%	88,6%

(1) Textura: arcilla 36.6 %, limo 37.4%, arena 26% suelo migajón arcilloso

El análisis de varianza de la regresión mostrado en el cuadro **(4.9)**, nos indica una alta correlación (R-Sq= 94.2 %) de la ecuación con los diferentes niveles de humedad del suelo y capacitores seleccionados. En la Fig. **(4.8)** se muestra la línea de respuesta.

Cuadro **(4.9)**. Análisis de varianza de húmeda del suelo en (mv) con capacitor 224.

Fuente	GL	Ss	Ms	F	P
Regresión	1	280845	280845	32,60	0,029
Error	2	17230	8615		
Total	3	298075			

GL.- Grados de libertad, Ss.- Suma de cuadrados, Ms.- Cuadrado medio, F.- factor F, P.-Probabilidad

La ecuación de regresión es:

Capacitor 224 = 8080 + 23,70 % de humedad

S = 92,8170 R-Sq. = 94,2% R-Sq. (adj) = 91,3%

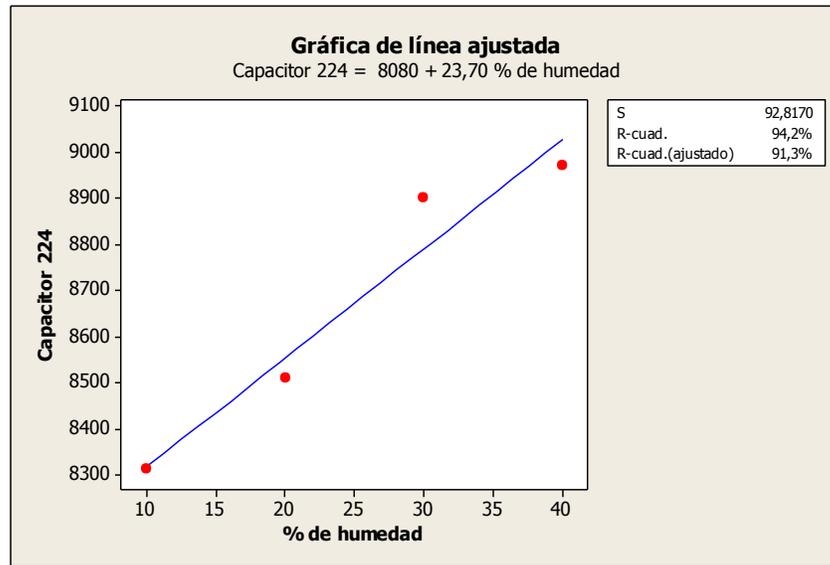


Fig. (4.8). Línea de respuesta de húmeda del suelo en (mv) con capacitor 224, discos a 30 cm.

En el cuadro (4.10) se muestran los resultados de humedad en un suelo ⁽¹⁾, utilizando los discos cortadores de residuos como electrodos a 35 cm de distancia entre discos; con 4 diferentes porcentajes de humedad, utilizando 5 diferentes capacitores.

Cuadro (4.10). Resultados en (mv) obtenidos con 4 diferentes porcentajes de humedad del suelo, utilizando los discos cortadores de residuos a 35 cm de distancia entre discos.

% de Humedad	Capacitor 151	Capacitor 102	Capacitor 103	Capacitor 224	Capacitor 334
	Voltaje (mv)				
10	29,4	175,2	1610	7820	7590
20	32,6	204,1	1936	8500	8460
30	31,8	197,9	1898	8900	8820
40	31,3	196,5	1845	8950	8900

(1) Textura: arcilla 36.6 %, limo 37.4%, arena 26% suelo migajón arcilloso

En el cuadro (4.11) se muestra el cuadro de ecuaciones obtenidas con 4 diferentes porcentajes de humedad, utilizando los discos cortadores de residuos a 35 cm de distancia entre discos con 5 diferentes capacitores.

Cuadro (4.11). Ecuaciones de humedad de suelo Vs voltaje obtenidas con el equipo de los discos cortadores de residuos a 35 cm de distancia entre discos.

Capacitor (Nanofaradios)	Ecuación de regresión	R-sq	R-sq(adj)
150	Capacitor 151 = 30,05 + 0,049 % de Humedad	21,6%	0,0%
1000	Capacitor 102 = 179,0 + 0,577 % de Humedad	35,0%	2,5%
10000	Capacitor 103 = 1695 + 5,470 % de Humedad	30,9%	0,0%
220000	Capacitor 224 = 7595 + 37,90 % de Humedad	87,8%	81,8%
330000	Capacitor 334 = 7320 + 43,90 % de Humedad	85,3%	77,9%

(1) Textura: arcilla 36.6 %, limo 37.4%, arena 26% suelo migajón arcilloso

El análisis de varianza de la regresión mostrado en el cuadro (4.12), nos indica una correlación (R-Sq= 87.8 %) de la ecuación con los diferentes niveles de humedad del suelo y capacitores seleccionados. En la Fig. (4.9) se muestra la línea de respuesta.

Cuadro (4.12). Análisis de varianza de húmeda del suelo en (mv) con capacitor 224.

Fuente	GL	Ss	Ms	F	P
Regresión	1	718205	718205	14,44	0,063
Error	2	99470	49735		
Total	3	817675			

GL.- Grados de libertad, Ss.- Suma de cuadrados, Ms.- Cuadrado medio, F.- factor F, P.-Probabilidad

La ecuación de regresión es:

Capacitor 224 = 7595 + 37,90 % de Humedad

S = 223,013 R-Sq. = 87,8% R-Sq.(adj) = 81,8%

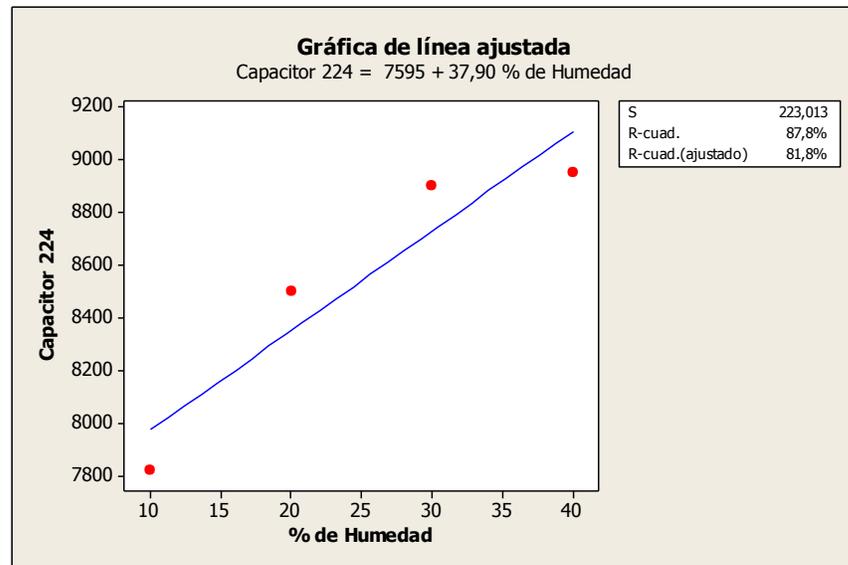


Fig. (4.9). Línea de respuesta de húmeda del suelo en (mv) con capacitor 224, discos a 35 cm.

En el cuadro (4.13) se muestran los resultados de humedad en un suelo ⁽¹⁾, utilizando los discos cortadores de residuos como electrodos a 40 cm de distancia entre discos; con 4 diferentes porcentajes de humedad, utilizando 5 diferentes capacitores.

Cuadro (4.13). Resultados en (mv) obtenidos con 4 diferentes porcentajes de humedad del suelo, utilizando los discos cortadores de residuos a 40 cm de distancia entre discos.

% de Humedad	Capacitor 151	Capacitor 102	Capacitor 103	Capacitor 224	Capacitor 334
	Voltaje (mv)				
10	30,5	184,8	1755	8000	7780
20	31,9	197,6	1860	8420	8050
30	30,8	192,2	1833	8880	8870
40	30,4	182,6	1780	8880	8870

(1) Textura: arcilla 36.6 %, limo 37.4%, arena 26% suelo migajón arcilloso

En el cuadro (4.14) se muestra el cuadro de ecuaciones obtenidas con 4 diferentes porcentajes de humedad del suelo, utilizando los discos cortadores de residuos a 40 cm de distancia entre discos con 5 diferentes capacitores.

Cuadro (4.14). Ecuaciones de humedad de suelo Vs voltaje obtenidas con el equipo de los discos cortadores de residuos a 40 cm de distancia entre discos.

Capacitor (Nanofaradios)	Ecuación de regresión	R-sq	R-sq(adj)
150	Capacitor 151 = 31,25 - 0,0140 % de Humedad	6,9%	0,0%
1000	Capacitor 102 = 192,3 - 0,1200 % de Humedad	5,1%	0,0%
10000	Capacitor 103 = 1795 + 0,480 % de Humedad	1,7%	0,0%
220000	Capacitor 224 = 7770 + 31,00 % de Humedad	89,5%	84,2%
330000	Capacitor 334 = 7435 + 39,60 % de Humedad	88,2%	82,3%

(1) Textura: arcilla 36.6 %, limo 37.4%, arena 26% suelo migajón arcilloso

El análisis de varianza de la regresión mostrado en el cuadro (4.15), nos indica una correlación (R-Sq= 89.5 %) de la ecuación con los diferentes niveles de humedad y capacitores seleccionados. En la Fig. (4.10). Se muestra la línea de respuesta.

Cuadro (4.15). Análisis de varianza de húmeda del suelo en (mv) con capacitor 224.

Fuente	GL	Ss	Ms	F	P
Regresión	1	480500	480500	16,98	0,054
Error	2	56600	28300		
Total	3	537100			

GL.- Grados de libertad, Ss.- Suma de cuadrados, Ms.- Cuadrado medio, F.- factor F, P.-Probabilidad

La ecuación de regresión es:

Capacitor 224 = 7770 + 31,00 % de Humedad

S = 168,226 R-Sq. = 89,5% R-Sq. (adj) = 84,2%

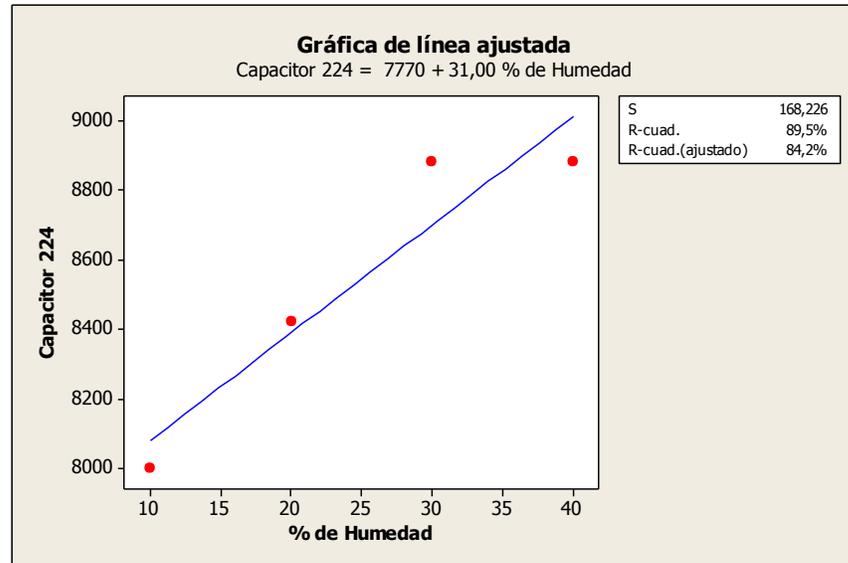


Fig. (4.10). Línea de respuesta de húmeda del suelo en (mv) con capacitor 224, discos a 40 cm.

V CONCLUSIONES

- 1.- Se adecuo el tractor John Deere 6403 para recibir los sistemas de Adquisición de datos (daqbook 200) y todos los periféricos, así como permitir que un operador fuera monitoreando en tiempo real la información proporcionada por el daqbook200.
- 2.- Se acondiciono el carro porta sensores con cilindro hidráulico para controlar la profundidad de las herramientas en un rango de 30 a 60 cm.
- 3.- Se construyeron los cuatro electrodos, con discos cortadores de residuos de 52cm de diámetro, así como el acoplamiento del los accesorios para inyectar voltaje a los mismos.
- 4.- En la medición de la humedad del suelo bajo condiciones de laboratorio, la mejor respuesta fue utilizando el capacitor de 224×10^4 Nanofaradios, presentando una línea de respuesta con una correlación superior del 87.0 %.
- 5.- En la medición de la humedad del suelo utilizando los discos cortadores de residuos como electrodos, la mejor repuesta fue a una distancia de 30 cm entre discos; utilizando el capacitor de 224×10^4 Nanofaradios, presentando una línea de respuesta con una correlación superior del 94.2 %.
- 6.- Para generar una mejor ecuación de calibración de referencia, incluir 3 capacitores adicionales en los rangos de 50 000, 100 000 y 150 000 Nanofaradios.
- 7.- En base a los resultados obtenidos en el presente proyecto, se cumplieron los objetivos planteados.

VI BIBLIOGRAFIA

1. Adriaanse, A. 1993. Environmental Policy Performance Indicators. A Study on the Development of Indicators for Environmental Policy in the Netherlands. Sdu Uitgeverij Koninginnergrach, The Netherlands.
2. Arshad, M.A. y Coen, G.M. 1992. Characterization of soil quality: Physical and chemical criteria. American J. of Alternative Agriculture 7: 25-31.
3. Astier, C.M., Mass-Moreno, M. y Etchevers, B.J. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelo en el contexto de la agricultura sustentable. Agrociencia 36: 605-620.
4. Bolstad, P. 2005. GIS Fundamentals: A first text on Geographic Information Systems, Second Edition. White Bear Lake, MN: Eider Press, 543 pp.
5. Bongiovanni, R.; Mantovani, E. C.; Best,S.; Roel, A. 2006. Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable.
6. Budd, W.W. 1992. What capacity the land? J. Soil Water Conservation 47: 28-31.
7. Buol, S. W. 1995. Sustainability of soil use. Annual Review of Ecology and Systematic 26:25-44.
8. Calderon, Saenz F., 2005. Laboratorios.
9. Carter, M.R., Gregorich, E.G., Anderson, D.W., Doran, J.W., Janzen, H.H. y Pierce, F.J. 1997. Concepts of soil quality and their significance. En Soil quality for crop production and ecosystem health eds.
10. Corwin, D.L. and J.D. Rhoades:<< Detrmining soil electricalconductivity using an inductive electromagnetic soil conductivity meter>>, Soil Sci. Soc. Amer.J.,45:255-260,1981.
11. Doran, J.W. y Parkin, B.T. 1994. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Soil Science Society of America, Inc. Special Publication. Number 35. Madison, Wisconsin, USA.
12. Dumanski, J., Gameda, S. y Pieri, C. 1998. Indicators of land quality and sustainable land management. The World Bank, Washington DC, USA.

- 13.** Goodland, R. y H. Daly. 1996. Environmental sustainability: universal and non negotiable. *Ecological Applications* 6:1002-1017.
- 14.** Gregorich, E.G., Carter, M.R., Angers, D.A., Monreal, C.M. y Ellert, B.H. 1994. Towards a minimum data set to asses soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian J. of Soil Science* 74: 367-386.
- 15.** Hünemeyer, J.A., De Camino, R. y Müller, S. 1997. Análisis del desarrollo sostenible en centroamérica: Indicadores para la agricultura y los recursos naturales. IICA/GTZ. San José, Costa Rica.
- 16.** Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F. y Schuman, G.E. 1997. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. *Soi Science Society of America J.* 61: 4-10.
- 17.** Larson, W.E. y Pierce, F.J. 1991. Conservation and Enhancement of Soil Quality. In *Evaluation for sustainable land management in the developing world*. En Proc. of the Int. Work-shop on Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World, Chiang Rai. pp. 175-203. 15-21 Sept. 1991. Int. Board of Soil Res. and Manage., Bangkok, Thailand.
- 18.** Lide D.R., 1992. *Handbook of Chemistry and Physics* 73rd edition.
- 19.** Lowdermilk, W.C. 1953. *Conquest of the Land Through Seven Thousand Years*. Agriculture Information Bulletin N° 99, USDA, Soil Conservation Service, Washington, D.C.
- 20.** Parr, J.F., Papendick, R.I., Hornick, S.B. y Meyer, R.E. 1992. Soil quality: attributes and relationships to alternative and sustainable agriculture. *American J. of Alternative Agriculture* 7: 5-11.
- 21.** PIÑA Avila, José Samuel. 2010. "Desarrollo de equipo para la generación de mapas de conductividad eléctrica georeferenciados". Tesis (Ingeniero Mecánico Agrícola). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, División de Ingeniería, Departamento de Maquinaria Agrícola. Saltillo; Coahuila, México. 91 p.

- 22.** Regalado, C.M., A. Ritter y R.M. Rodríguez-González. 2007. Performance of the commercial WET capacitance sensor as compared with Time Domain Reflectometry in volcanic soils. *Vadose Zone J.* 6: 244 - 254.
- 23.** Romig, D.E., Garlynd, M.J., Harris, R.F. y McSweeney, K. 1995. How farmers assess soil health and quality. *J. Soil Water Conservation* 50: 229-236.
- 23.** Singer, M.J. y Ewing, S. 2000. Soil Quality. En *Handbook of Soil Science*. Chapter 11 (ed. Sumner, M. E.), 271-298, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- 24.** Sojka, R.E y Upchurch, D.R. 1999. Reservations Regarding the Soil Quality Concept. *Soil Science Society of America J.* 63: 1039-54.
- 25.** SQI-Soil Quality Institute. 1996. Indicators for Soil Quality Evaluation. USDA Natural Resources Conservation Service.
- 26.** [http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_Informaci%C3%B3n_Geogr%C3%](http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_Informaci%C3%B3n_Geogr%C3%93)
- 27.** <http://www.soildoctor.com/Abrate.PDF>.
- 28.** <http://usuarios.lycos.es/zandoli/web3/Capacidad%20de%20intercambio%20cat ionico.html>.
- 29.** <http://www.sws.uiuc.edu/warm>.
- 30.** <http://climate.umn.edu/>.
- 31.** http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_Informaci%C3%B3n_Geogr%C3%A1fica.

VII ANEXOS

ANEXO A. Tractor John Deere 6403 acondicionado.



ANEXO B. Carro porta sensores.



ANEXO C. Hojas de datos del C.I. LM2907.



May 2003

LM2907/LM2917 Frequency to Voltage Converter

General Description

The LM2907, LM2917 series are monolithic frequency to voltage converters with a high gain op amp/comparator designed to operate a relay, lamp, or other load when the input frequency reaches or exceeds a selected rate. The tachometer uses a charge pump technique and offers frequency doubling for low ripple, full input protection in two versions (LM2907-8, LM2917-8) and its output swings to ground for a zero frequency input.

The op amp/comparator is fully compatible with the tachometer and has a floating transistor as its output. This feature allows either a ground or supply referred load of up to 50 mA. The collector may be taken above V_{CC} up to a maximum V_{CC} of 28V.

The two basic configurations offered include an 8-pin device with a ground referenced tachometer input and an internal connection between the tachometer output and the op amp non-inverting input. This version is well suited for single speed or frequency switching or fully buffered frequency to voltage conversion applications.

The more versatile configurations provide differential tachometer input and uncommitted op amp inputs. With this version the tachometer input may be floated and the op amp becomes suitable for active filter conditioning of the tachometer output.

Both of these configurations are available with an active shunt regulator connected across the power leads. The regulator clamps the supply such that stable frequency to voltage and frequency to current operations are possible with any supply voltage and a suitable resistor.

Advantages

- Output swings to ground for zero frequency input
- Easy to use; $V_{OUT} = f_{IN} \times V_{CC} \times R1 \times C1$

- Only one RC network provides frequency doubling
- Zener regulator on chip allows accurate and stable frequency to voltage or current conversion (LM2917)

Features

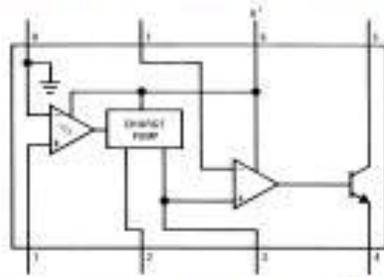
- Ground referenced tachometer input interfaces directly with variable reluctance magnetic pickups
- Op amp/comparator has floating transistor output
- 50 mA sink or source to operate relays, solenoids, meters, or LEDs
- Frequency doubling for low ripple
- Tachometer has built-in hysteresis with either differential input or ground referenced input
- Built-in zener on LM2917
- $\pm 0.3\%$ linearity typical
- Ground referenced tachometer is fully protected from damage due to swings above V_{CC} and below ground

Applications

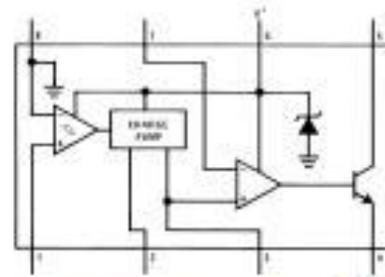
- Over/under speed sensing
- Frequency to voltage conversion (tachometer)
- Speedometers
- Breaker point dwell meters
- Hand-held tachometer
- Speed governors
- Cruise control
- Automotive door lock control
- Clutch control
- Horn control
- Touch or sound switches

Block and Connection Diagrams

Dual-In-Line and Small Outline Packages, Top Views



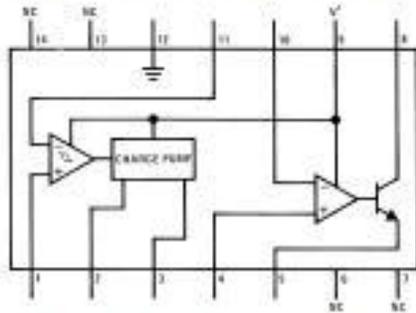
Order Number LM2907M-8 or LM2907N-8
See NS Package Number M08A or N08E



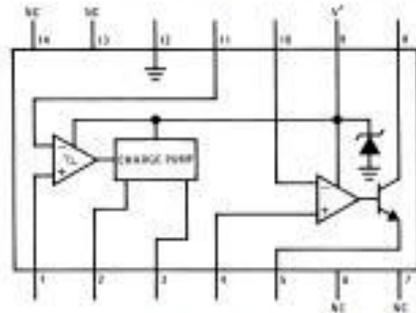
Order Number LM2917M-8 or LM2917N-8
See NS Package Number M08A or N08E

LM2907/LM2917

Block and Connection Diagrams Dual-In-Line and Small Outline Packages, Top Views (Continued)



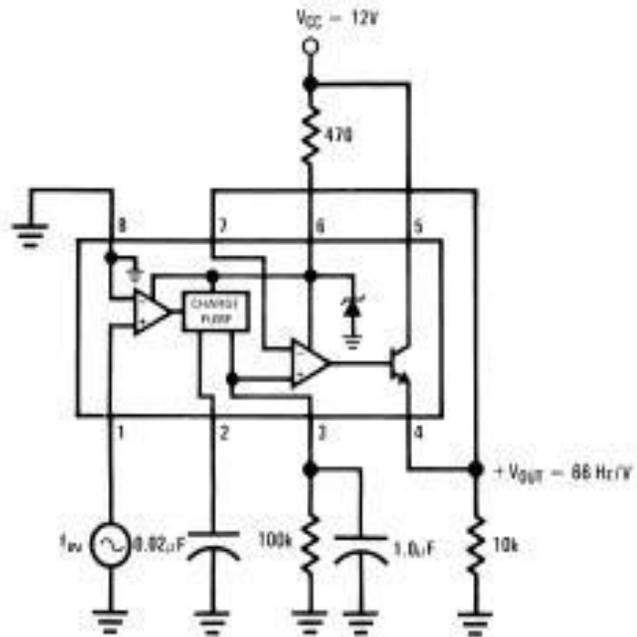
Order Number LM2907M or LM2907N
See NS Package Number M14A or N14A



Order Number LM2917M or LM2917N
See NS Package Number M14A or N14A

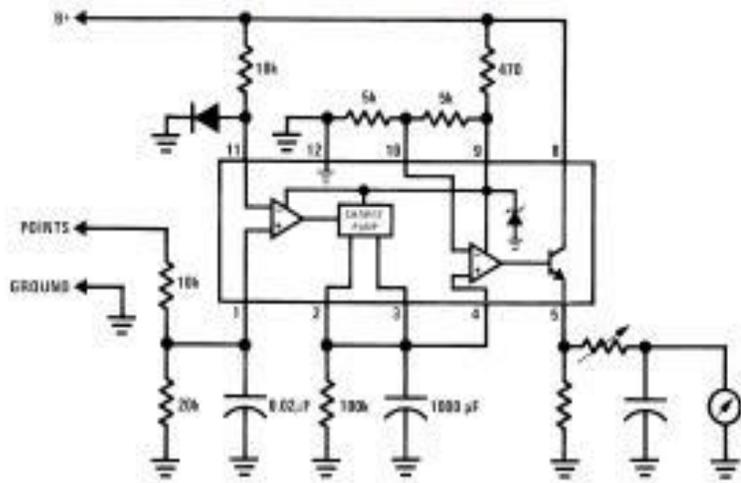
Typical Applications (Continued)

Zener Regulated Frequency to Voltage Converter



0276210

Breaker Point Dwell Meter



0276211