

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA**



**Elaboración de mapas de energía de laboreo primario para el uso de labranza
de precisión**

Por:

BARTOLOMÉ JOSÉ DE JESÚS

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Octubre 2017

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA

Elaboración de mapas de energía de laboreo primario para el uso de labranza
de precisión

POR:

BARTOLOMÉ JOSÉ DE JESÚS

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

Aprobada por comité de tesis:

Asesor principal



Dr. Santos Gabriel Campos Magaña

Sinodal



Ing. Héctor Emilio González Ramírez

Sinodal



Ing. Rosendo González Garza

Coordinador de División de Ingeniería



Dr. Luis Samaniego Moreno

Universidad Autónoma Agraria
"ANTONIO NARRO"



Coordinación de
Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Octubre 2017

AGRADECIMIENTOS-DEDICATORIAS

Agradecimiento

A Dios

Estoy más que agradecido con el todopoderoso por concederme salud, bienestar, fortaleza, por iluminarme el camino, por darme la fuerza de voluntad en los momentos más difíciles y permitirme cumplir con éxito este sueño.

A MI ALMA TERRA MATER UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO (UAAAN).

Siempre recordare a esta gran universidad, que me dio la oportunidad de formar parte de una sociedad, donde se forman futuros profesionistas preocupados por el campo. Aprovecho para agradecer a ustedes compañeros de la carrera, muchos momentos de alegría, diversión, tristeza, tropiezos, de lucha, desvelos, pero siempre con el firme objetivo de llegar a la meta.

Al grupo Tierra Mestiza, y al Club de basquetbol porque al ser un anhelo pertenecer a estos grupos y lograrlo, me dio mucha confianza para seguir adelante.

Dr. Santos Gabriel Campos Magaña.

Por brindarme su confianza para formar parte de sus proyectos, por el tiempo dedicado a la elaboración de este proyecto, experiencias y conocimientos compartidos.

Ing. Gilbert Fresh López López.

Ing. Diego Cruz Hernández

Por apoyarme, guiarme, compartir sus grandes experiencias y conocimientos, y también por prestar su tiempo en todo momento.

A mis maestros

MC. Juan Antonio Guerrero Hernández.

ING. Rosendo González Garza

DR. Martín Cadena Zapata.

M.C. Genaro Demuner Molina

M.C. Blanca Elizabeth De La Peña Casas.

M.C. Tomás Gaytán Muñiz

M.C. Gerardo Sánchez Martínez

M.C. Héctor Uriel Serna Fernández

Por compartir sus grandes conocimientos, experiencias y dar los mejores consejos durante mi carrera profesional y agradezco también a todos aquellos profesores que no mencioné pero que también fueron un gran motor en mi vida académica.

Dedicatorias

“Agradezco a Dios por lo afortunado que soy de que ustedes me dieran la vida, ustedes me enseñaron a ser humilde y sencillo, a ser fuerte en los obstáculos, a levantarme en cada caída para llegar a cada meta que me he propuesto, con esta gran FORTUNA me siento capaz de trabajar de la mejor manera, seguir adelante en cada proyecto y objetivo que me proponga.

Estoy infinitamente agradecido por todo el sacrificio que han hecho en cada etapa de mis estudios.

A mis hermanos:

Oliva Hipólito De Jesús y familia

Me siento muy feliz y agradecido con ustedes por terminar este estudio, muy importante fue el apoyo que recibí de ustedes, aquellas vacaciones en las que compartía con ustedes las buenas y malas experiencias de mi carrera profesional, y al final siempre una palabra de aliento o un consejo que como hermana mayor sabes dar.

Renato José de Jesús y familia

Estoy agradecido porque eres el hermano mayor que como una forma de apoyo me dio trabajo en las veces que acudí a ti, valoro todas aquellas experiencias compartidas y que me han servido en la formación de la carrera emprendida.

Luisa José de Jesús y familia

Eres la segunda madre de nosotros, estoy más que agradecido porque también te has sacrificado por darnos lo necesario, por las veces que te desvelaste, las veces que madrugaste, porque sabes que tú y tus hijas son un motor importante en esta familia, y sobretodo porque siempre has estado pendiente de nuestra mamá y de tus hijas, te quiero hermana. A tus hijas porque entendieron lo importante que es trabajar en esta familia y por los momentos que nos han alegrado la vida.

Leodegario José de Jesús y familia

Eres el hermano que me hizo llegar a esta altura, nunca faltaron tus consejos acertados cuando lo pedí, tu apoyo, tus experiencias de estudiante me sirvieron mucho para afrontar mi carrera, te admiro mucho hermano, gracias por esos momentos de trabajo que estuvimos compartiendo en diferentes localidades, siempre aprenderé de ti.

María José de Jesús y familia

Querida hermana por considerarme como uno de los hermanos más divertidos y amigables, me ha servido mucho para relacionarme con mis compañeros y amigos de la carrera, también estoy muy agradecido con mi cuñado, por las veces que me dio trabajo, gracias por los consejos, por prevenirme de los vicios y por las vibras que me siguen dando.

Cresencio José de Jesús

Hermano muchas gracias por haberme apoyado tanto a mí como a mamá y papá, eres uno de los hermanos que quisieran otras familias, eres el ejemplo a seguir, porque tuviste esa meta de ser alguien en la vida, y que nosotros lo tomamos como base, espero que nunca cambies. Compartimos el gusto por el basquetbol y grandes momentos de alegría nos ha brindado ese deporte.

Lucio José de Jesús

Primeramente quiero decirte que fuimos uno de los hermanos que compartimos grandes emociones en la infancia, que para todo le dábamos sentido a la vida, me siento muy orgulloso de tener un hermano que le gusta compartir a la sociedad y a nuestra gente sobre todo, anteponiendo siempre el bien. Y por último agradezco tus grandes consejos y motivaciones.

Tomás José de Jesús

Hermanito fuimos los últimos hijos de la familia, me siento feliz de pasar esta etapa de mi carrera a tu lado, porque a pesar de ser el menor, me has sugerido, compartido y platicado como ser mejores cada día, también quiero reconocer que la música ha sido un vínculo para nosotros, ha sido de gran ayuda para los dos como una forma de superar obstáculos y mejorar cada día. Agradezco tu comprensión.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
ÍNDICE DE CUADROS	vii
RESUMEN.....	viii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	4
2.1. Objetivos específicos.....	4
III. HIPÓTESIS	4
IV. REVISIÓN DE LITERATURA	5
4.1. Agricultura de precisión (AP)	5
4.2. Labranza vertical (AP).....	9
4.3. Mapa de rendimiento.....	13
4.3.1. Obtención de mapa de rendimiento	14
4.4. Sistemas de posicionamiento.....	15
4.4.1. Sistema de Posicionamiento Global (GPS).....	15
4.4.2. Variabilidad	17
4.4.3. Mapas de diagnóstico del suelo.....	18
4.4.4. Medición de variabilidad	20
4.5. Penetrómetro.....	25
4.5.1. Resistencia a la penetración	26
4.5.2. Sensores de medición de distancia	28
4.5.3. Sonar LV-MaxSonar-EZ1	29
4.6. Mecánica de suelos	30
V. METODOLOGÍA	36
5.1. Materiales, Equipos y Software.....	36
5.2. Fase de laboratorio.....	42
5.2.1. Acondicionamiento de carro porta-sensores.....	42
5.2.2. Calibración de los sensores.....	43
5.3. Fase de campo.....	43
5.3.1. Ubicación.....	44
5.3.2. Levantamiento de datos	44

VI. RESULTADOS	48
6.1. Partes del equipo	48
6.2.1. Resistencia a la roturación del suelo comparado con Resistencia a la penetración del suelo con H1 promedio de 11.4%	49
6.2.2. Resistencia a la roturación del suelo comparado con Resistencia a la penetración del suelo con H1 promedio del 11.4%	50
6.2.3. Resistencia a la roturación del suelo comparado con Resistencia a la penetración del suelo (profundidad 0.20-0.30 m) con H1 promedio del 11.4%	51
6.2.4. Resistencia a la roturación del suelo (sensor 2) comparado con resistencia a la penetración del suelo con humedad promedio del 11.7% (suelo seco). 51	
6.2.5. Resistencia a la roturación del suelo (sensor 2) comparado con resistencia a la penetración del suelo con H1 promedio igual a 11.7%	53
6.2.6. Resistencia a la roturación del suelo (sensor 2) comparado con resistencia a la penetración del suelo con H1 promedio del 11.7%	53
6.2.7. Resistencia a la roturación del suelo (RRS) comparado con resistencia a la penetración del suelo (RPS) con H2 promedio del 16.3%	54
6.2.8. Resistencia a la roturación del suelo (RRS) comparado con resistencia a la penetración del suelo (RPS) con H2 promedio del 16.3%	55
6.2.9. Resistencia a la roturación del suelo (RRS) comparado con resistencia a la penetración del suelo (RPS) con H2 promedio 16.3%	56
6.2.10. Resistencia a la roturación del suelo (RRS) comparado con resistencia a la penetración del suelo (RPS) con H2 promedio 16.3%	57
6.2.11. Resistencia a la roturación del suelo (RRS) comparado con resistencia a la penetración del suelo (RPS) con H2 promedio del 16.3%	58
6.2.12. Resistencia a la roturación del suelo (RRS) comparado con resistencia a la penetración del suelo (RPS) con H2 promedio del 16.3%	59
6.2.13. Resistencia a la roturación del suelo (RRS) vs resistencia a la penetración del suelo (RPS) con H3 promedio igual a 16.3%	60
6.2.14. Resistencia a la roturación del suelo (RRS) vs resistencia a la penetración del suelo (RPS) con H3 promedio del 16.3%	61
6.2.15. Resistencia a la roturación del suelo (RRS) vs resistencia a la penetración del suelo (RPS) con H3 promedio del 16.3%	62
6.2.16. Resistencia a la roturación del suelo (RRS) comparado con resistencia a la penetración del suelo (RPS) con H3 promedio del 16.4%	63
6.2.17. Resistencia a la roturación del suelo (RRS) comparado con resistencia a la penetración del suelo (RPS) con H3 promedio del 16.4%	64
6.2.18. Resistencia a la roturación del suelo (RRS) comparado con resistencia a la penetración del suelo (RPS) con H3 promedio del 16.4%	65

6.2.19. Referencia de los datos de Resistencia a la penetración y de Resistencia a la roturación	66
VII. CONCLUSIONES Y RECOMEDACIONES	68
7.1. Conclusiones	68
7.2. Recomendaciones	68
VIII. LITERATURA CITADA	69
IX. ANEXOS	73
Anexo 1	73
9.1. Pasos para la generación de los mapas en ArcView 3.2	73
9.2. Tabla de datos promediados para la resistencia a la penetración.	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1 Interacción entre varios elementos que integran la agricultura de precisión, fuente: Universidad del País Vasco, 2000.....	7
Figura 4.2 las tres etapas de la agricultura de precisión, fuente: AGCO	9
Figura 4.3 Mapa de rendimiento y detalle de puntos	14
Figura 4.4 Sensor de flujos de granos	15
Figura 4.5 Mapa ArcView 3.2 interpolación (Salas, 2013).....	20
Figura 4.6 Mapa de preproducción.....	21
Figura 4.7 Mapas de rendimientos de diferentes años.	21
Figura 4.8 Variabilidad de la estimación del rendimiento.	22
Figura 4.9 A la izquierda, representación de los datos de posición y rendimiento, sin tratamiento con SIG. A la derecha, la mis parcela tras tratar los datos con un SIG.	22
Figura 4.10 Mapa de resistencia a la penetración en 3D (Salas, 2013).	28
Figura 4.11 Figura Sonar LV-MaxSonar-EZ1 (MaxBotix, 2014).....	30
Figura 4.12 El interior del triángulo está dividido en casillas, cada una de ellas representa una clase textural de suelo caracterizado por las proporciones de uno o de dos elementos dominantes; suelos arenosos, limosos, arcillosos, arcillo arenosos, etc. (Rucks, 2004).	31
Figura 4.13 Variación de las fuerzas resistentes del suelo en función de la humedad (Universidad de Castilla-la Mancha 2004).	34
Figura 5.1 Tractor NEWHOLLAND 6810.....	36
Figura 5.2 Carro porta-sensores.....	37
Figura 5.3 Transductor octagonal extendido amarillo-rojo (Fx) y verde-azul (Fx).	37
Figura 5.4 Dos cinceles rectos y un angular con alas	38
Figura 5.5 Sonda del penetrómetro.....	38
Figura 5.6 Penetrómetro digital.....	39
Sistemas de adquisición de datos	39
Figura 5.7 Sistema de posicionamiento global, (AgDGPS) Trimble (132)	39
Figura 5.8 Computadora Dell	40
Figura 5.9.Convertidor analógico-digital LogBook/360 y DBK-43 A	40
Figura 5.10 Software Microsoft Excel 2013	41
Figura 5.11. Software ArcViev Gis 3.2.....	41

Figura 5.12 Acondicionamiento del carro porta-sensor.....	42
Figura 5.13 Parcela en el jardín hidráulico (UAAAN)	44
Figura 5.14 Calibración y nivelación del carro porta-sensor (RRS)	45
Figura 5.15 Calibración y nivelación del carro porta-sensor (RPS)	46
Figura 5.16 Distribución de líneas con separación de 1.70 metros y distribución de punto a punto con distancia de 10 metros.....	46
Figura 6. 1 Tractor completo y el carro porta-sensor	48
Figura 6.2 Resistencia a la roturación del suelo (sensor 1) y resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.20-0.25 m	50
Figura 6.3 Resistencia a la roturación del suelo (sensor 1) y resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.25-0.30 m	50
Figura 6.4 Resistencia a la roturación del suelo (sensor 1) y resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.20-0.30 m	51
Figura 6. 5 Resistencia a la roturación del suelo (sensor 1) y resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.30-0.35 m	52
Figura 6.6 Resistencia a la roturación del suelo (sensor 2) y resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.35-0.40 m	53
Figura 6.7 Resistencia a la roturación del suelo y Resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.30-0.40 m.....	54
Figura 6.8 Resistencia a la roturación del suelo (sensor 1) y resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.20-0.25 m	55
Figura 6.9 Resistencia a la roturación del suelo (sensor 1) y resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.25-0.30 m	56
Figura 6.10 Resistencia a la roturación del suelo y Resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 20-30 cm	57
Figura 6.11 Resistencia a la roturación del suelo (sensor 1) y resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.30-0.35 m	58
Figura 6.12 Resistencia a la roturación del suelo (sensor 2) y resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.35-0.40 m	59
Figura 6.13 Resistencia a la roturación del suelo y Resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.30-0.40 m.	60
Figura 6.14 Resistencia a la roturación del suelo (sensor 1) y resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.20-0.25 m	61

Figura 6.15 Resistencia a la roturación del suelo (sensor 1) y resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.25-0.30 m	62
Figura 6.16 Resistencia a la roturación del suelo y Resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.20-0.30 m.....	63
Figura 6.17 Resistencia a la roturación del suelo (sensor 2) y resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.30-0.35 m	64
Figura 6.18 Resistencia a la roturación del suelo (sensor 1) y resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.35-0.40 m	65
Figura 6.19 Resistencia a la roturación del suelo y resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.30-0.40 m.....	66

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 4.1 Etapas para la aplicación de agricultura de precisión (USDA, 1998).	11
Cuadro 4. 2 Clase textural representada por esa casilla por ejemplo, franco, arcillo arenoso, etc. (Rucks, 2004).	31
Cuadro 5.1 Valores y canales para la conexión de los sensores RPS Y RRS a la escala del acondicionador de señales DBK-43 A.	43
Cuadro 6.1 Enumeración de las partes de carro porta-sensor.	48
Cuadro 6.2 Referencia de valores de Resistencia a la penetración y Resistencia a la roturación del suelo con diferentes profundidades y humedades.	67
Cuadro 9.1. Datos promediados de la resistencia a la penetración del suelo con porcentaje de humedad promedio del 11.4% y 11.7%	81
Cuadro 9.2. Datos promediados de la resistencia a la penetración del suelo con porcentaje de humedad promedio del 14.3%.	82
Cuadro 9.3. Datos promediados de la resistencia a la penetración del suelo con porcentaje de humedad promedio del 14.3%.	83

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se realizó en el Jardín hidráulico de Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) con las coordenadas de latitud de 29 °11 '34.7 N, longitud de 112 °28 '20.7 O y altitud de 1766 msnm, el objetivo del proyecto es elaborar mapas de diagnóstico de resistencia a la penetración (RPS) y de resistencia a la roturación (RRS) empleando un carro porta-sensores, en donde fueron montados tres sensores un penetrómetro de cono y dos octagonales de anillo extendido trabajando a profundidades de 20-30 cm y de 30-40 centímetros respectivamente. Después del análisis de los mapas de diagnóstico generados en ArcView 3.2 se encontró una correlación entre la resistencia de roturación con la resistencia a la penetración de 2771.7 N por cada MPa con una desviación estándar de 1705.1 N MPa⁻¹. Se requiere incrementar el número de muestreos en otros sitios con un amplio rango de cohesión del suelo, con la finalidad de determinar una ecuación de correlación entre el esfuerzo a la roturación vs esfuerzo a la penetración con una correlación superior al 50%.

Palabras claves: Agricultura de Precisión, Correlación entre mapas, Mapas de Diagnóstico, Sensor Penetrómetro, Sensores Octagonales de Anillo Extendido.

I. INTRODUCCIÓN

Cuando se habla de agricultura no se puede evitar pensar en Sinaloa y sus numerosos valles, los cuales destacan por su gran fertilidad y extensión, indudablemente, Sinaloa posee una riqueza y ventaja agrícola que cualquier otro estado de México y es envidiado como región productiva a nivel mundial. Este estado ha tenido una época de una alta productividad agrícola que lamentablemente va en declive por acciones poco amigables con el ambiente y situaciones como el cambio climático, sin dejar de lado el reto más importante de tiempos contemporáneos: la seguridad alimenticia mundial.

Según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2009), para el 2050 seremos alrededor de nueve billones de humanos poblado el planeta, lo que significa que necesitamos doblar la producción de alimentos para satisfacer la demanda de esta hambrienta población. Partiendo de esta premisa nace la gran interrogante: ¿Qué vamos hacer?

Una solución podría aumentar la superficie de 4, 911, 622, 700 Ha actualmente se destinan al uso agrícola. Realmente no es una opción ya que se tendría que deforestar, adaptar desiertos o remover ciudades. Una solución realista es el uso eficiente de los recursos enfocado a aumentar los rendimientos de los cultivos asistidos por biotecnología.

La propuesta más eficaz tanto en producción como económicamente, es la agricultura de precisión es una estrategia de manejo de cultivo que se basa en obtener información de distintas fuentes tecnológicas como satélites, sensores, drones, equipos de aplicación variable, sistemas de irrigación variable, entre otros.

Todo esto con el objetivo de saber, donde cuanto y cuando se requiere acciones de fertilización, nutrición, riego y labores. Pero no termina ahí, la agricultura de precisión da la habilidad de resolver el cómo, ejecutar la solución efectiva tanto para el cultivo como para los costos.

Con la llegada de la mecanización y la producción en gran escala, los campos cultivados pasaron a ser tratados de forma uniforme. Las tasas de aplicación de fertilizantes pasaron a ser calculados en base a valores medios de fertilidad y la aplicación hecha uniformemente en toda la extensión del campo. Este tratamiento

uniforme puede generar pérdidas económicas para el agricultor y puede causar daños ambientales importantes.

Para revertir esta situación surgir la posibilidad de aplicar una nueva tecnología llamada AP, que puede ser descrita como un desarrollo tecnológico que incorpora nuevas técnicas o modifica las ya existentes, para producir un conjunto de herramientas para aumentar la eficiencia del gerenciamiento agrícola, permitiendo la aplicación de insumos agrícolas en el lugar correcto y en las cantidades requeridas. Esta nueva tecnología se basa en que mayores y mejores informaciones sobre el lugar donde será implantado el cultivo y una producción histórica de este sean conocidas a lo largo de varios años. Para obtener esta información que no se puede basar más en medias y con representación en pequeñas celdas (algo en torno a 25 a 100 m²) dentro de la tierra cultivada con el uso de GPS (Global Positioning System), que permite coleccionar datos georreferenciados.

Una importante etapa de este proceso de levantamiento de información es la obtención de mapas de productividad para los cultivos tradicionales producidos en gran escala en países desarrollados, como por ejemplo el trigo y la soja, ya fueron desarrollados varios tipos de sensores que son capaces de medir las cantidades de granos cosechados a medida que la cosechadora avanza en el campo, posibilitando así que asociado con la información localizada de la cosechadora provista por el GPS, pueda generar un mapa de productividad permitiendo identificar áreas de diferentes productividades.

La existencia de reducción de costos y aumento de productividad hace que la aplicación de estas nuevas tecnologías se extienda a otros cultivos, como por ejemplo a la caña de azúcar, que en Brasil tiene gran importancia económica, con 4,2 millones de hectáreas plantadas. Como se trata de un cultivo con características propias y bien distinta de los granos, es necesario desarrollar un sistema de monitoreo de producción específico, que aliado a la información del GPS permita generar mapas de rendimiento para este cultivo, siendo este el principal objetivo del trabajo. Se espera con esto, contribuir para el control y consiguiente economía de los productores aplicados, reduciendo el riesgo de polución ambiental, disminuyendo el costo de producción, y consolidando el liderazgo del país en este sector. (Pagnano y Magalhaes. 2010).

La aparición de sistemas de posicionamiento global precisos y relativamente económicos, combinados con los monitores de rendimiento, proveen la oportunidad de grabar y mapear instantáneamente los rendimientos de los cultivos durante la cosecha. El rendimiento integra la variabilidad del campo y clima, puede proveer información útil para identificar zonas de manejo, las que se han definido como subregiones dentro de los lotes que expresan una combinación relativamente homogénea de factores determinantes de rendimiento para los que es apropiada una proporción única de insumos. Sin embargo, debido a la variación climática interanual, es difícil identificar zonas de manejo basándose en el mapa de rendimiento de un solo año.

Aunque el mapa de rendimiento de un año es útil para interpretaciones de posibles causas de la variación de rendimiento, resulta de valor limitado para la toma de decisiones de estrategias de manejo sitio-específico de periodos de mediano o largo plazo. Aumentar el número de años usados para definir zonas que pueden ser una solución para este problema. Con datos de rendimiento de varios años, pueden identificarse patrones de rendimientos y separar las causas naturales de la variación de aquellas debidas al manejo o errores de medición.

La variación debida al manejo influye eventos aleatorios que típicamente ocurren en parches pequeños, como fallas de siembra y en el establecimiento del cultivo, fertilización desuniforme, daños de herbicidas, daños de enfermedades, entre otros. En los errores de medición influyen errores de sensores de flujo y humedad de granos, errores debidos a la georreferenciación y el movimiento de la cosechadora, errores de operario, y errores del procesamiento de datos.

El objetivo de este módulo es brindar herramientas metodológicas para el procesamiento de capas vectoriales en un GIS, que serán aplicadas a la generación de zonas de manejo uniforme a partir de mapas de diagnósticos. El procedimiento influye la eliminación de datos erróneos o "limpieza" de los archivos de datos de rendimiento, construcción y procesamiento de mapas promedio de múltiples años. (Albarenque, 2011).

II. OBJETIVOS

Desarrollar una metodología para determinar el consumo de energía de laboreo empleando dos métodos de diagnósticos.

2.1. Objetivos específicos

Elaborar mapas de diagnósticos para determinar el consumo de energía empleando un penetrómetro y el cincel de roturación.

Determinar la correlación existente entre los mapas de resistencia a la penetración y resistencia a la roturación.

III. HIPÓTESIS

Existe una correlación entre los valores de resistencia a la penetración y resistencia de roturación para determinar el consumo de energía de laboreo primario.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Agricultura de precisión (AP)

La AP es una tecnología de información basada en el posicionamiento satelital y que consiste en obtener datos Geo-referenciados en los lotes para un mejor conocimiento de la variabilidad de rendimiento expresado por los cultivos en diferentes sitios como loma, media loma y bajo se obtiene mejor respuesta en lotes que posean alta variabilidad de potencial de rendimiento ya sea por relieve, historia de lote (secuencia de cultivos y fertilizaciones anteriores).

También con esta tecnología es posible ajustar la mejor dosis de fertilización para cada sitio o lote específicamente, el mejor híbrido, variedad, densidad de siembra, espaciamiento entre hileras, etc. Los beneficios se pueden resumir valorando el análisis y diagnóstico posible de realizar, partiendo de más de 800 datos de rendimiento por hectárea versus el análisis de promedio de rendimiento de todo un lote que ofrece la agricultura tradicional sin la ayuda del monitor de rendimiento satelital (Bragachini. 2004).

AP es un concepto agrícola basado en la existencia de variabilidad en campo. Requiere el uso de nuevas tecnologías, tales como sistemas de posicionamiento global (GPS), sensores, satélites e imágenes aéreas junto con herramientas de manejo de información (SIG) para estimar, evaluar y entender dichas variaciones. La aplicación más exitosa de la AP ha sido los monitores de rendimientos instalados en cosechadoras. La mayoría de la tecnología de computación aplicada a la agricultura en el pasado estaba destinada a tareas que los productores encontraban aburridas y desagradables (ejemplos; impuestos, contabilidad, pagos). Los monitores brindan información sobre algo en que los productores tienen un interés apasionado: el rendimiento de los cultivos. El uso de monitores de rendimiento ha crecido rápidamente desde las pruebas en campo realizadas con algunos equipos en 1992. Los monitores tienden a estar instalados en cosechadoras modernas, más grandes, por eso se estima que se utilizaron en aproximadamente el 8% de la superficie cosechada de cereales y oleaginosas. Los monitores de rendimiento originales eran para granos de cereales y oleaginosas, pero hoy en día se están desarrollando para un amplio rango de cultivos,

influyendo forraje, remolacha azucarera, papa, tomate, maní y uvas. También se están desarrollando métodos, a través de un GPS, para lograr mapas espaciales de cultivos cosechados a mano, como manzanas y peras, los primeros monitores de rendimiento solamente medían la cantidad producida. Actualmente se está desarrollando y comercializando equipamientos para medir contenido de proteína de grano y otros parámetros de calidad, sobre la marcha (López, 2012).

En relación al desarrollo y perfeccionamiento de métodos para el sensoramiento de la conductividad eléctrica (CE) Corwin y Rhoades (1981), indica que por métodos no invasivos de la CE del suelo, constituye un tema de gran importancia en los esfuerzos que se realizan en 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.

Las características del suelo y del cultivo varían en el espacio (distancia y tiempo) y en el tiempo. La agricultura de precisión es un conjunto de técnicas orientadas a optimizar el uso de los insumos agrícolas (semillas, agroquímicos y correctivos) en función de la cuantificación de la variabilidad espacial y temporal de la producción agrícola, esta optimización se logra con la distribución de la cantidad correcta de los insumos, dependiendo del potencial y la necesidad de cada punto de las áreas de manejo.

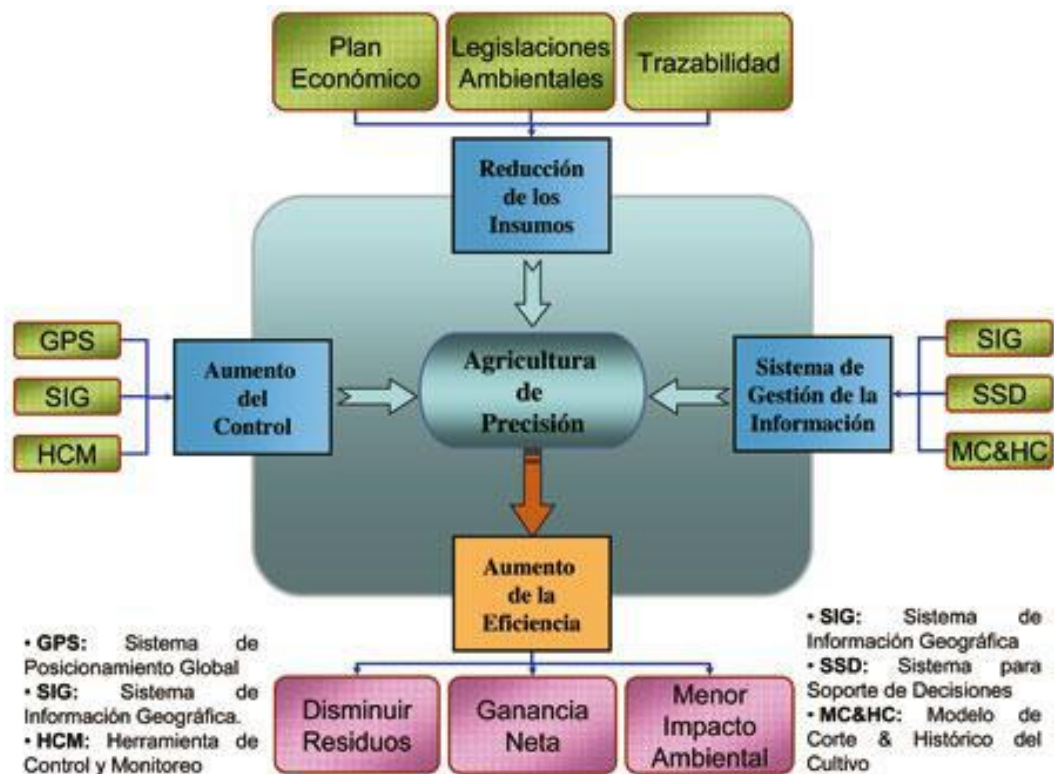


Figura 4.1 Interacción entre varios elementos que integran la agricultura de precisión, fuente: Universidad del País Vasco, 2000

Se requiere para lo anterior contar con sistemas que se integren entre otros por AgDGPS (sistema de posicionamiento Global Diferencial), sensores, SIG (Sistemas de Información Geográfica) así como la 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 mil unidades de producción, argentina con 1200, Brasil con 250, Reino Unido con 400, Paraguay con 4 y México con cero unidades (AGCO, 2005).

Por tal motivo durante la convocatoria interna 2009, para proyectos de investigación de la universidad fue presentado y autorizado un proyecto de investigación denominado:

DESARROLLO DE EQUIPO, SENSORES E INSTRUMENTOS PARA AGRICULTURA Y LABRANZA DE CONSERVACION cuyos objetivos planteados fueron:

- Fortalecer la enseñanza e investigación en agricultura de precisión.

- Evaluación de calidad de equipos agrícolas de labranza de conservación.
- Desarrollo de un sistema de simulación de dosis variable de semillas.
- Sistemas de Dosificación Variable de Semillas en tiempo real.
- Desarrollo de equipos para la generación de mapas de la conductividad eléctrica, resistencia al corte y penetración geo-referenciados.
- Desarrollo de un sistema integral para el monitoreo de fuerzas en equipos de labranza.

La agricultura de precisión no consiste en medir solamente la variabilidad que existe en el área sino también en la adopción de prácticas administrativas que se realizan en función de esa variabilidad. De acuerdo con Robert (1999), la observación de la existencia de la variabilidad en las propiedades o en factores determinantes de la producción en los agro-ecosistemas no es una novedad. Lo que es diferente, en realidad, es la posibilidad de identificar, cuantificar y mapear esa variabilidad. Más aun, es posible geo-referenciar y aplicar los insumos con dosis variables en puntos o áreas de coordenadas geográficas conocidas. Los agentes involucrados en el desarrollo y adaptación de las prácticas de la agricultura de precisión suelen dividir este conjunto de tecnologías en tres etapas diferentes AGCO 2005 (Allis Corporation Gleaner), (Figura 4.2): 1) Recolección de datos 2) Procesamiento e interpretación de la información 3) Aplicación de insumos.

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

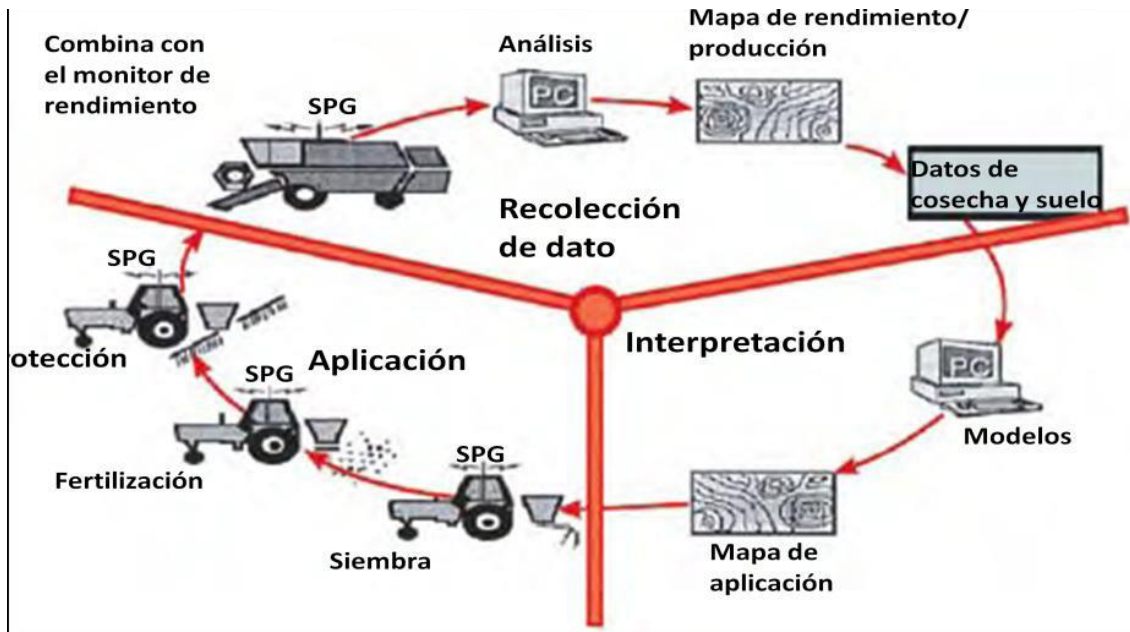


Figura 4.2 las tres etapas de la agricultura de precisión, fuente: AGCO (2005)

La AP es una estrategia de manejo que utiliza la tecnología de la información para captar datos de múltiples fuentes para generar decisiones asociadas a la producción de cultivos (Council, 1997).

Otra definición de la AP es un sistema de producción que se basa en la integración de la información y la producción, con objeto de incrementar en el largo plazo, la eficiencia, productividad y margen de ganancia, minimizando los indeseados impactos sobre el ambiente (Bill, 1996).

4.2. Labranza vertical (AP)

Para la optimización del consumo de energía en la aplicación de labranza primaria del suelo, es importante la integración tecnológica del uso de labranza vertical (LV) basado en la Teoría de la Profundidad Crítica y la Agricultura de Precisión, incorporando parámetros y componentes de operación que en forma individual representan un ahorro significativo de energía de aplicación de Labranza Vertical en comparación con el sistema utilizado en forma tradicional, aunado lo anterior, se adicionó el uso de la agricultura de precisión con el manejo heterogéneo o de sitio específico para aplicar labranza profunda variable. En la tecnología de Labranza Vertical, se desarrolla un sistema de monitoreo integral de fuerzas de reacción del suelo y evaluación el

funcionamiento del implemento de labranza. Para ello el equipo está conformado por tres transductores Octagonales de Anillo Extendido (OAE) y una estructura acoplada entre el enganche del tractor y el implemento a evaluar. Estos resultados en laboratorio muestran una correlación de 99.9%, garantizando alta confiabilidad y precisión en cada sensor.

Por otra parte, el diseño, construcción y evaluación de un prototipo articulado de arado de cinceles con aplicación variable de Labranza Vertical en forma automática, a través del uso de componentes electrohidráulicos. Este arado es evaluado en campo con 15 arreglos con los cuatro parámetros de operación más significativos en ahorro de energía en Labranza Vertical, (profundidad de trabajo, posición y espaciamiento de cinceles, número de cuerpos y uso de alas). El mejor arreglo fue para la configuración de seis cinceles (cuatro someros a 0.20 m de profundidad y espaciados a 1.20 m) en comparación con el sistema tradicional de siete cinceles. Se obtuvieron ahorros altamente significativos de: 23.88% en la energía total consumida, 40% en la demanda de fuerza de tiro, 38.68% en la resistencia específica, por una reducción no significativa de área disturbada del 7.35%. En el presente trabajo se utilizó un carro porta-sensores para la medición de parámetros físicos del suelo, el cual incluye el Penetrómetro; integrado por dos sensores, para la medición de la magnitud y profundidad de las capas duras del suelo, con lo que se generaron mapas de diagnóstico de resistencia a la penetración. Así mismo, el equipo cuenta con un controlador FMX, con sistema GPS-RTK para la geo-referenciación de la variable. Una vez ubicadas las capas duras en los mapas de diagnóstico, se generan los mapas de prescripción con multiplane o con Field Level II. Los mapas de prescripción elaborados se cargan en el controlador (pantalla FMX) para realizar la labor de labranza vertical automatizada en campo. Con la integración de ambos sistemas se proyecta un ahorro de energía total consumida en MJha^{-1} de 26.58 y 40.73% para la aplicación de labranza diferenciada a profundidades de trabajo de 0.20 Y 030 m, respectivamente. (REYNOLDS 2012).

La agricultura de precisión es una aproximación a un sistema para manejar cultivos y suelos en forma selectiva de acuerdo con sus necesidades. Utiliza la experiencia de muchas disciplinas e integran las últimas herramientas y tecnologías de información que permiten a los administradores de fincas tener una mejor comprensión y control

de sus lotes, la administración es el factor esencial para alcanzar el resultado indicado en la finca, por lo cual los administradores deberán de identificar sus propias estrategias y prácticas que permitan un manejo efectivo de la variabilidad encontrada en la finca.

Tres tipos de variabilidades han sido identificados. El primer tipo es la variabilidad espacial, la cual puede ser vista como los cambios a través del lote. Un ejemplo, puede ser cuando un sector del lote genera rendimientos superiores frente a otro sector del mismo lote, inclusive frente a un vecino. La segunda variabilidad es la temporal que se refiere al cuando los parámetros cambian a través del tiempo. Puede verse cuando un cultivo tiene una buena fase de desarrollo pero posteriormente arroja varios rendimientos. El tercer tipo es la variabilidad predictiva que explica la diferencia entre lo que el productor predice que va a suceder y lo que realmente ocurre.

El ejemplo básico de esta variabilidad predictiva es cuando el productor predice que una cierta productividad puede ser lograda, si determinada cantidad de fertilizante es aplicada, pero el cultivo no alcanza esto por causa del cambio climático u otro factor, cada tipo de variabilidad puede ser medida, evaluada y posiblemente influenciada, dependiendo con cuan significativa es.

En el cuadro (4.1), se presentan las principales etapas o pasos para la aplicación de AP (Agricultura de Precisión), las tecnologías involucradas y las actividades realizadas. En AP existen dos aproximaciones para la aplicación en variables de insumos. La primera de ellas se basa en el muestro y mapeo de los factores de producción a ser manejados en forma diferencial (fertilidad de suelo, malezas, etc.) y la posterior elaboración de mapas de prescripción para la aplicación variable de los insumos (fertilizantes, herbicidas, etc.). La segunda aproximación es el sensoramiento directo del suelo y/o cultivo para la aplicación inmediata de los insumos en forma variable. El uso de una u otra dependerá del nivel tecnológico disponible y el costo de operación involucrado.

Cuadro 4.1 Etapas para la aplicación de agricultura de precisión (USDA, 1998).

ETAPA	TECNOLOGIA INVOLUCRADA	ACTIVIDADES
--------------	-----------------------------------	--------------------

<p>Recolección e ingreso de datos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de posicionamiento global (GPS). sistemas de información geográfica (SIG). • Instrumentos topográficos. • Sensores remotos. • Sensores directos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Medición de la topografía del suelo. • Muestreo de suelos en grilla. <p>Recorrido de los cultivos para la detección de plagas y enfermedades.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Monitoreo de rendimientos. • Medición directa de propiedades del suelo y cultivos. • Sensoria-miento remoto de suelos y cultivos. • Digitalización de mapas.
<p>Análisis, procesamiento e interpretación de la información.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Programas de SIG. 	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de dependencia espacial.

	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas expertos. • Programas estadísticos. • Experiencia del operador. 	<ul style="list-style-type: none"> • Confección de mapas de evaluación. • Confección de mapas de prescripción. • Otras.
Aplicación diferencial de insumos.	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología de dosis variables. • Pulverización asistida por GPS. • Programas computacionales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicación variable de nutrientes. • Aplicación variable de plaguicidas. • Siembra diferencial de variedades y aplicación variable de semillas. • Otras.

4.3. Mapa de rendimiento

Un mapa de rendimiento posee formato vectorial, donde los datos se representan utilizando puntos, y sistemas de coordenadas x, y (cartesiano) referencia las ubicaciones del mundo real (Figura 4.3).

Cada punto de un mapa posee coordenadas, y la cantidad de información que se obtiene de cada punto depende del monitor de rendimiento que se utilice; estos pueden ser: altura cabezal, ancho de franja, distancia recorrida, velocidad de avance, flujo de granos, humedad de grano, pérdidas de cosecha, entre otros.

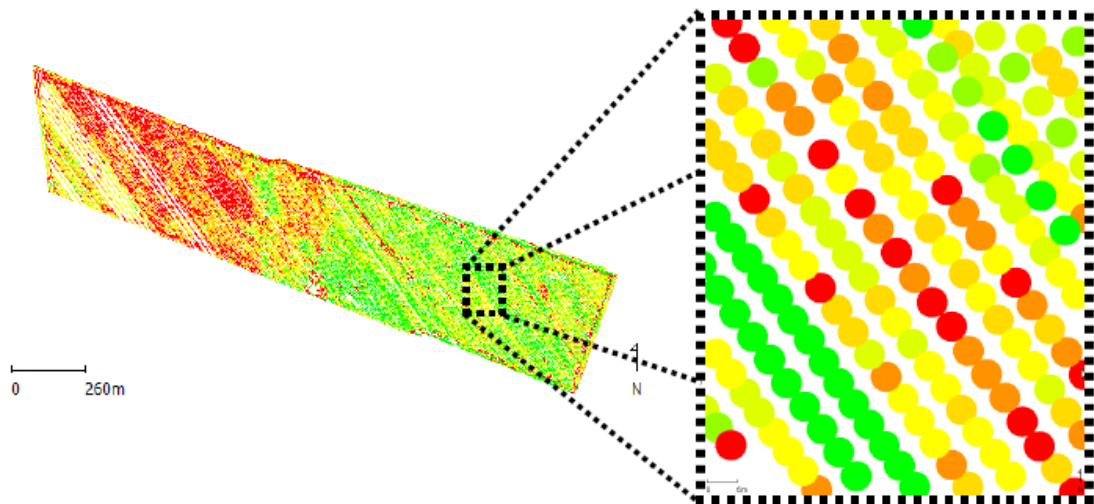


Figura 4.3 Mapa de rendimiento y detalle de puntos

4.3.1. Obtención de mapa de rendimiento

Los mapas de rendimiento se obtienen a partir de los datos recopilados por una cosechadora que incluye un sistema de posicionamiento global (GPS) junto con un sistema de sensores que calculan la cantidad de grano cosechado.

Existen diferentes monitores de rendimiento actualmente disponibles en el mercado. Entre ellos se encuentran los que utilizan una placa de impacto en el camino del flujo de grano (Figura 4.4). El impacto de los granos es medido por una celda de carga, dispositivo que transforma la fuerza incidente en una señal eléctrica. Adicionalmente, la mayoría de los sistemas de monitoreo de rendimiento influye un sistema automático de medición de humedad de grano. Esto permite que cada dato de rendimiento tenga un valor de contenido de humedad asociado, el cual puede ser utilizado para la representación gráfica del rendimiento a un contenido de humedad estándar. (Albarenque, 2011).

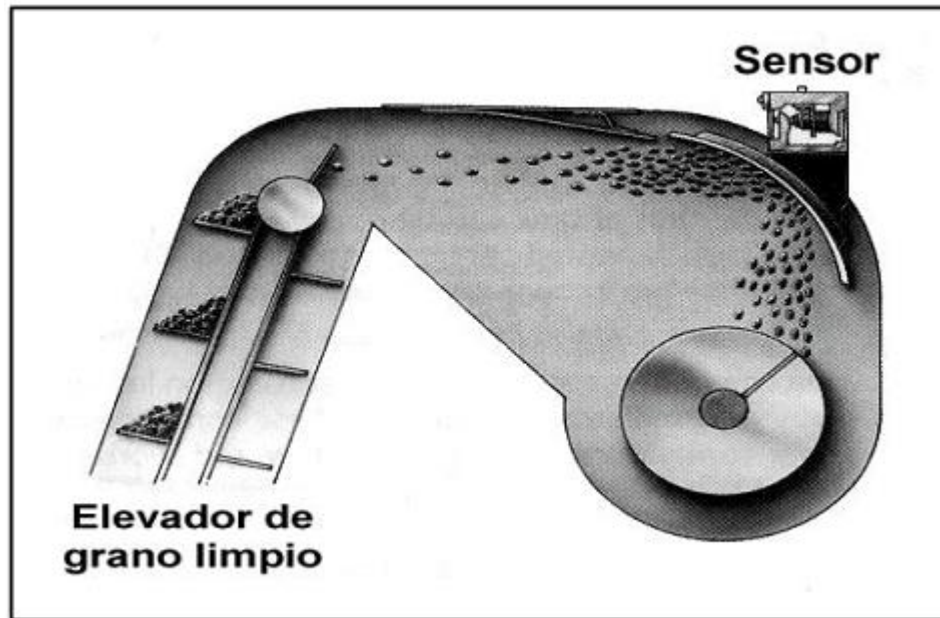


Figura 4.4 Sensor de flujos de granos

4.4. Sistemas de posicionamiento

Un sistema de posicionamiento, como el nombre lo sugiere, es un método para identificar y grabar, generalmente en forma electrónica, la ubicación de un objeto o persona. Este sistema puede ser usado para registrar el recorrido de un vehículo a través de la superficie terrestre, en el aire o en el espacio. Estos sistemas pueden ser de gran utilidad en la agricultura de precisión, ya que cada dato tomado, como por ejemplo rendimiento, humedad, altimetría, materia orgánica, etc., va estar exactamente localizado y de esta forma tenemos la posibilidad de volver a él, localizarlo, obrar en consecuencia, y poder grabar nuevamente el resultado. Existen una serie de sistemas de posicionamiento, algunos terrestres y dos satélites. En este capítulo se explicara solamente el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), que es el de mayor difusión en la Argentina y es el que posee más y mejores prestaciones.

4.4.1. Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

El sistema de posicionamiento global (GPS) es un sistema de navegación basado en satélites, creado y operado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos. Comenzando a principios de los 80`este sistema fue declarado completamente

operacional el 27 de Abril de 1995. Completamente operacional significa que el sistema puede ser usado para determinar la posición de un receptor las 24 horas del día, en cualquier parte de la tierra. El sistema fue concebido originalmente como un auxiliar para la navegación para las fuerzas militares de los Estados Unidos, pero hoy en día el GPS sirve también para fines industriales, comerciales y civiles. El servicio está disponible, en forma gratuita, las 24 horas del día y bajo cualquier condición meteorológica.

Para describir mejor el sistema se lo puede dividir en tres partes:

- Segmento espacial
- Segmento de control
- Segmento de usuario

4.4.1.1. Segmento espacial

Este segmento consiste de una constelación de 24 satélites NAVSTAR (NAVigation by Satellite Timing and Ranging). Con una órbita de 20200 km de altura (10900 millas) sobre la superficie terrestre, cada satélite orbita la tierra 2 veces al día, o sea una vez cada 12 horas. Los 24 satélites se dividen en 6 orbitas con 4 satélites cada una. Esta distribución particular garantiza que por lo menos 4 satélites estarán en línea de vista de un receptor de GPS en cualquier parte del mundo durante todo el día.

Por supuesto que no se pueden ver los satélites en su órbita, pero los receptores deben ser capaces de recoger la señal satelital enviada por la tierra. Los satélites cuya señal puede ser recibida son aquellos que están por sobre el horizonte, cada satélite está equipado con receptores y emisores de ondas de radio que transmiten con una frecuencia de entre 1200-1500 MHz. Las ondas de radio viajan a la velocidad de la luz (300.000.000 m/s) en el vacío, y disminuye su velocidad cuando atraviesa la atmosfera terrestre.

Los satélites también están equipados con relojes atómicos, que mantienen el tiempo en base a vibraciones naturales periódicas dentro de los átomos. Estos relojes increíblemente precisos son un componente crítico que hace posible el uso de satélites

para navegación y mapeo. Cada satélite cuenta con cuatros relojes, 2 de cesio y 2 de rubidio, a pesar de que uno sería suficiente, de esta forma se evita el riesgo de rotura o pérdida de precisión por alguno de los relojes.

4.4.1.2. Segmento de control

Los satélites son seguidos y monitoreados por varias estaciones ubicadas estratégicamente alrededor del mundo. Esta red de estaciones de monitoreo se denomina generalmente segmento de control del GPS, y consta de 4 estaciones de monitoreo y una estación de control principal ubicada en la Base de la Fuerza Aérea Falcón en Colorado Springs, Colorado.

Las estaciones de monitoreo miden las señales de ondas de radio que son transmitidas continuamente por los satélites y pasan esa información a la estación de control principal. Esta usa información para determinar la órbita exacta de los satélites y para ajustar sus señales de navegación, por ejemplo: error de reloj, correcciones, estado del satélite, etc.

4.4.1.3. Segmento de usuario

Las unidades o receptores GPS son el segmento de usuario, que computan la posición del usuario por medio de las señales recibidas. Los GPS de uso civil no requieren licencia para operar ya que no transmiten señales de radio, solamente las reciben. Hay una gran gama de receptores con distintas precisiones y por ende precio, cada uno se adapta a un uso en particular. (Martini *et al.* 1999).

4.4.2. Variabilidad

Los mapas de rendimientos permiten cuantificar la variabilidad de rendimiento existente durante la cosecha de un cultivo del lote, quedando grabada 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 algunas herramientas de la agricultura de precisión, entre ellas el monitor de

rendimiento, podemos conocer el área que ocupa cada sitio y cuantificar sus diferentes de rendimiento.

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

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.

La variabilidad temporal se pone de manifiesto de 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.

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.

Antes de entrar a toma de decisiones respecto a estas variabilidades se deben comprender, por lo tanto previamente como medirlas.

4.4.3. Mapas de diagnóstico del suelo

El mapa de rendimiento produce información detallada de la productividad del campo y brinda parámetro para diagnosticar y corregir las causas de bajos rendimientos en algunas áreas del campo y/o estudiar las causas por las cuales el rendimiento más alto de algunas zonas. El sistema guarda registros de:

- Campo
- Variedades
- Descargas
- Tiempos

Un monitor de rendimiento es un sistema que recoge la información procedente de distintos sensores y gracias a un software calcula el rendimiento de un cultivo en el tiempo y en el espacio, basándose en la información de localización de cada parcela proporcionada por el sistema de localización por satélite GPS. El resultado se representa en un mapa gráfico (García y Flego. 2002).

Las cartas de uso del suelo precisas y actualizadas a nivel estatal por una parte son un elemento primordial para la planeación del desarrollo agrícola, pecuario y forestal; por otra parte contribuyen a la toma de decisiones.

Mediante la integración de orto fotos digitales, mapa base, herramientas SIG y recorridos de campo es posible identificar y cuantificar las áreas con uso agrícola; sin embargo, la precisión y confiabilidad de sus resultados forman parte de un proceso gradual que se ve sujeto a la cantidad de los insumos, herramientas y metodologías empleadas (Paredes *et al.*, 2011).

En los estudios sobre la cartografía del uso del suelo agrícola es importantes tomar en cuenta que existe gran diferencia entre los términos cobertura del suelo y uso del suelo. Cobertura se refiere a los objetos que se encuentran sobre zonas específicas y su distribución, mientras que uso del suelo se refiere a las actividades sociales y económicas que se llevan a cabo dentro del territorio, con presencia de una cobertura específica de suelo (François *et al.*, 2008).

El trabajar con imágenes de escalas mayores nos lleva a considerar aspectos que tienen que ver con la resolución vectorial de los datos, estos corresponden a la resolución espacial de las orto fotos, (el tamaño promedio de los vectores, representa los rasgos de tipo línea y área). Es decir, se deben aprovechar por una parte el nivel de acercamiento, que permiten las orto fotos para digitalizar los datos con mayor nivel de detalle, por otra parte representar los datos en escalas mayores para hacer posible colocar información vectorial sobre los orto fotos y garantice su consistencia geométrica (INEGI, 2004).

La AP la cual, representa una alternativa de optimización mediante el uso de herramientas que permiten la obtención y análisis de datos geo-referenciados, mejorando el diagnóstico, la toma de decisiones y la eficiencia en el uso de insumos en tiempo real. Para la aplicación de esta tecnología se requiere de una fase de

diagnóstico previo de rendimiento, combinado con muestreo de ambientes a nivel de sitio 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.

Conforme a los resultados obtenidos en la prueba de campo se generó un mapa de diagnóstico y se hizo una interpolación en ArcView 3.2 donde se muestran los puntos de muestreo y los MPa que se registraron en cada punto de prueba, ver Figura (4.5) (Salas, 2013).



Figura 4.5 Mapa ArcView 3.2 interpolación (Salas, 2013)

4.4.4. Medición de variabilidad

La variabilidad espacial: esta se puede medir mediante la obtención de datos sobre factores con localización precisa. Los mapas de rendimientos se producen realizando un seguimiento del rendimiento a la cosechadora, o maquina recolectora, tal que se conoce la cantidad cosechada en un determinado tiempo. Un DGPS (GPS Diferencial) se utiliza para obtener la localización para la posición de los rendimientos que se están obteniendo. Un sistema similar se utiliza para el muestro del suelo, excepto si las muestras recogen a mano, y se envían posteriormente al laboratorio para su análisis, en este último caso se utiliza un GPS para el posicionamiento del lugar de la toma de muestras (figura 4.6).

Estos datos se filtran y se representan como mapas que muestran la variabilidad espacial.

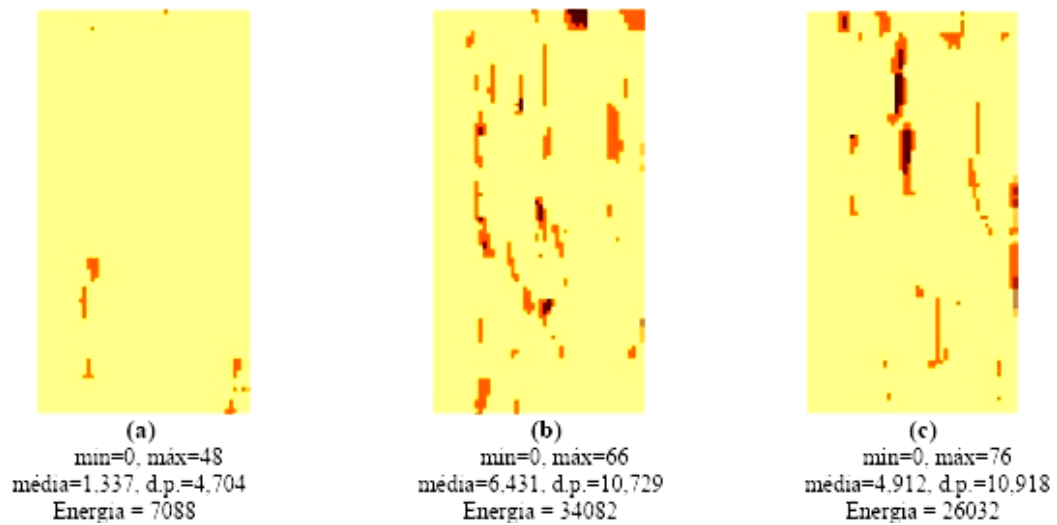


FIGURA 4.6 Mapa de reproducción.

La variabilidad temporal: se obtiene mediante la información y comparación de mapas que se han sido obtenidos a lo largo del tiempo. (Figura 4.7).

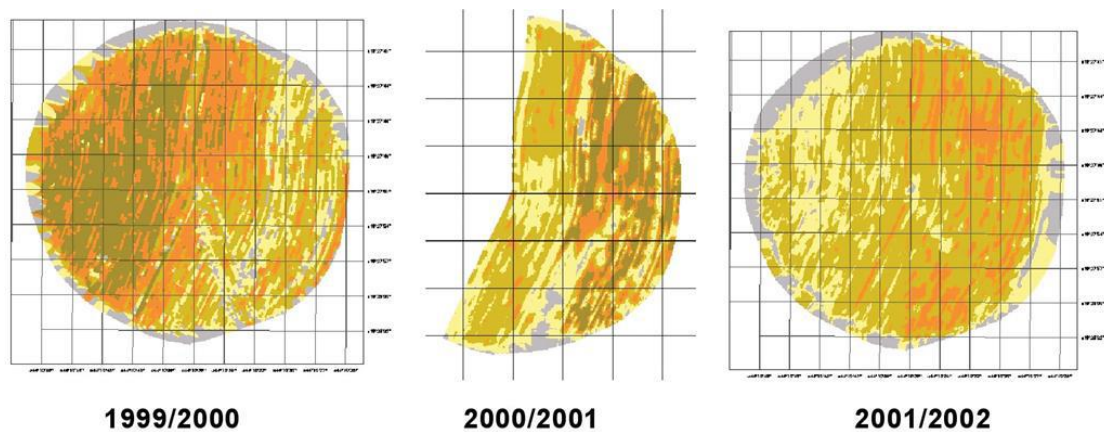


Figura 4.7 Mapas de rendimientos de diferentes años

La variabilidad en la estimación: esta variabilidad se obtiene midiendo la diferencia entre los valores para el cultivo, y los valores conseguidos. Los valores que más se utilizan son los de área de producción, el rendimiento y calidad. La calidad es difícil de predecir, hasta los estudios tardíos de la producción, mediante la medida de la clorofila, y la realización de un mapa de clorofila. (Figura 4.8).

La mayoría de los trabajos publicados relacionados a sistemas de determinación de producción de productos agrícolas para la elaboración de mapas de rendimiento están en el área de granos, donde empresas como John Deere (1998) y AGCO (1999),

desarrollan sensores de flujo de masa específicos, para determinar la producción y la humedad de granos y software para manejar estos datos y generar los mapas de rendimiento.

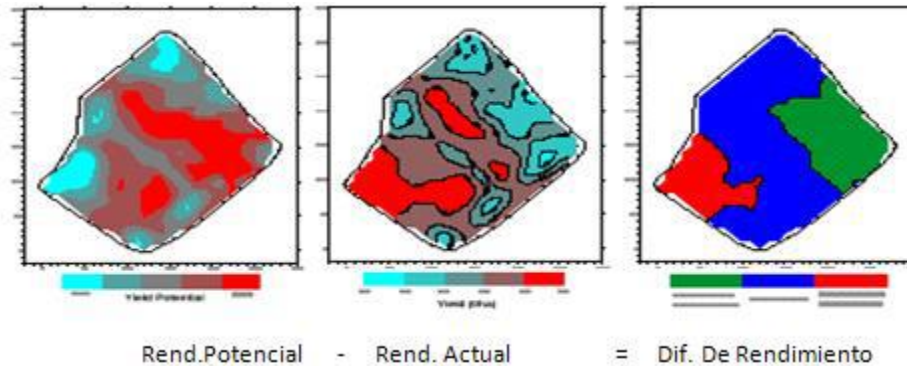


Figura 4.8 Variabilidad de la estimación del rendimiento.

La práctica más importante, quizá, son los mapas de rendimientos, para ella son necesarias una serie de tecnologías, tenemos como ejemplo una cosechadora del cereal.

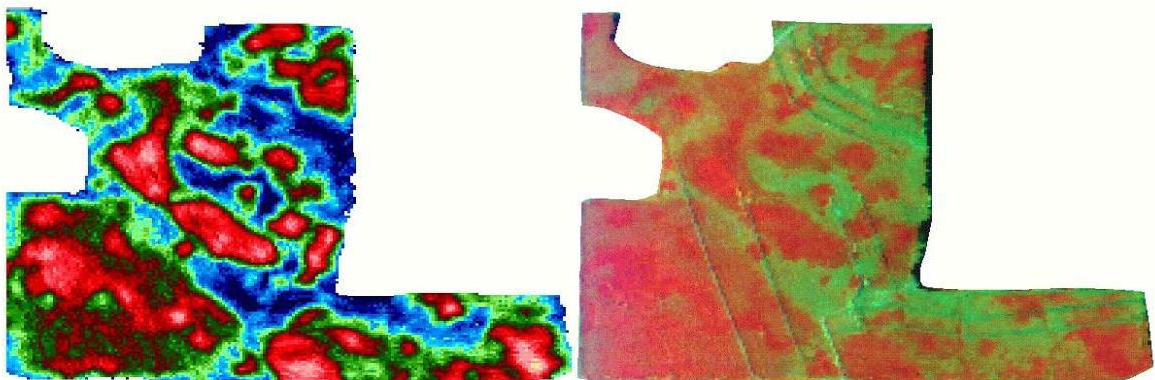


Figura 4.9 A la izquierda, representación de los datos de posición y rendimiento, sin tratamiento con SIG. A la derecha, la mis parcela tras tratar los datos con un SIG

Será necesario un receptor GPS montado sobre la cosechadora, el cual obtendrá segundo a segundo la información de la posición en el campo, a medida de que la cosechadora avanza por el campo. Además, esta cosechadora debe tener dos sensores, uno para medir el flujo de grano, y otro para medir la humedad del grano cosechado. A medida que la máquina avanza, un ordenador recoge la información que le llega del GPS, con un intervalo de 1.2 segundos registrando la latitud y la longitud y de los dos sensores.

Normalmente la información se almacena en memoria PCMCIA la cual puede extraerse de este ordenador, y pasar su información posteriormente al ordenador de la oficina.

Si se realizase una representación de esta información, se obtendría la parte izquierda de la figura 4.9 la cual como se ve es difícil de interpretar. Por lo tanto es necesario un software que permita una mejor lectura o interpretación de los datos, estos programas informáticos son los SIG (Sistemas de Información Geográfica). Así la figura antes mencionada, aparecerá suavizada, como en la parte derecha de la figura 4.9.

Norton y Swinton, (2001), describe una metodología del manejo integral utilizando herramientas de obtención de datos geo-referenciados de rendimiento (mapas anteriores de trigo y maíz del lote), muestreos del suelo dirigidos, análisis y siembra de maíz con densidad y fertilización variable de acuerdo a prescripciones geo-referenciadas. Que incluye la identificación de zonas de rendimientos diferentes dentro del lote a través de mapas anteriores, maíz y trigo; realización de un muestreo representativo de cada una de las zonas, como muestras compuestas geo-referenciadas con sub muestras de cada uno de los lugares seleccionados: Análisis de la correlación de rendimientos/características química-físicas de suelo: Priorización de los datos de rendimiento de los mapas anteriores, como dato de peso en la estimación de rendimiento sitio específico del maíz del presente año; Definición de 4 ambientes de rendimiento en maíz (99 qq/ha), (90 a 105), (105-120) y (+ de 120), como dato para el cálculo de fertilización.

Teniendo como criterio que donde más rindió en los mapas anteriores se estima que se expresara con un mayor potencial de rendimiento y por ende serán necesario mayor necesidad de nutrientes; Análisis de respuestas variables de cada dosis de fertilizante en cada ambiente para luego realizar un análisis económico para determinar la conveniencia o no del de este tipo de tecnología de siembra variable con sembradora inteligente donde los ambientes justifiquen.

Andrade (2005) construyó un bastidor porta-sensores para medir el estado físico-mecánico del suelo, en el presentan los detalles en el diseño y construcción de un bastidor que provee soporte a un sistema de componentes electrónicos y mecánicos capaz de realizar mediciones del estado físico mecánico en suelos agrícolas. El

sistema de medición consta de equipo electrónico para la captura de información, sistema de posicionamiento global (DGPS), y equipo sensorial para detectar cambios en el estado físico-mecánico del suelo.

Este bastidor fue diseñado para funcionar bajo dos modalidades: a) mediciones continuas de la resistencia del suelo al corte, y b) mediciones puntuales de la resistencia del suelo a la penetración.

En la relación al diseño de sensores de fuerzas Marín (2003), Diseñó y construyó dos dinamómetros de tipo axial, con capacidad de 45 y 70 KN, los cuales permiten registrar las fuerzas de reacción del suelo en la interacción del tractor, implemento y suelo, Gallegos (2004), menciona que la resistencia de un suelo a la penetración de una determinada herramienta de sondeo, constituye una variable que aglutina otras propias del suelo tales como compactación, cohesión y rozamiento interno.

Hinojosa. (2003), Determinó la magnitud de las fuerzas de reacción del suelo que actúan sobre los diferentes implementos integrales, así como su dirección y posición en una línea de acción. Graham et al. (1990) Desarrolló como parte de un sistema de monitoreo de variables, un transductor de tipo hidráulico empleando para medir fuerzas de tiro en la evaluación de implementos remolcados. Godwin y Spor citado por campos (2000) indican que uno de los aspectos importante en la evaluación de nuevos diseños de herramientas de labranza es el proceso de medición de las magnitudes de las fuerzas que actúan en dichos implementos. Vásquez J, Johnny; Rivera, Arturo (2004). Andrade et al. (2001, 2002) citado por: Gallegos (2004) han reportado resultados de diversos análisis donde se relacionan las condiciones físicas del suelo con la reacción mecánica del suelo durante operaciones de labranza. Godwin et al, (1987) encontraron que la fuerza de tracción es mínima donde el ángulo de la inclinación vertical esta entre 0,380 y 0,254 rad, siendo esta la resistencia. Gill et al (1982), quienes también encontraron que la penetración de los discos es mayor si se aumenta el peso de estos, y que la velocidad de operación no afecta la profundidad de trabajo en suelos. Mello y Magalhães (1995) en un trabajo realizado sobre un suelo arcilloso, encontraron que la velocidad de operación no afectó la fuerza de tracción y que dicha fuerza crece al aumentar el ángulo de horizontal y le área del suelo removido, sin inducir significativamente en la resistencia específica.

Spoor y Godwin (1978), afirmaron que la movilización del suelo depende de la profundidad de trabajo, del tamaño del cincel (largo y ancho), además de la humedad y densidad del suelo. Magalhães y Souza (1990) Para el análisis de las fuerzas horizontal (Fh) y vertical (Fv) utilizó un anillo octagonal extendido, el cual permite la medición de estas fuerzas y la localización de la fuerza resultante.

La agricultura de precisión es una tecnología de información basada en el posicionamiento satelital y que consiste en obtener datos Geo-referenciados en los lotes para un mejor conocimiento de la variabilidad de rendimiento expresado por los cultivos en diferentes sitios como loma, media loma y bajo se obtiene mejor respuesta en lotes que posean alta variabilidad de potencial de rendimiento ya sea por relieve, historia de lote (secuencia de cultivos y fertilizaciones anteriores).

También con esta tecnología es posible ajustar la mejor dosis de fertilización para cada sitio o lote específicamente, el mejor híbrido, variedad, densidad de siembra, espaciamiento entre hileras, etc. Los beneficios se pueden resumir valorando el análisis y diagnóstico posible de realizar, partiendo de más de 800 datos de rendimiento por hectárea versus el análisis de promedio de rendimiento de todo un lote que ofrece la agricultura tradicional sin la ayuda del monitor de rendimiento satelital (Bragachini, 2004).

4.5. Penetrómetro

El penetrómetro de cono, es un dispositivo que mide la fuerza requerida para empujar un cono de metal verticalmente dentro del suelo (ASAE, 2002). Los penetrometros son ampliamente utilizados para medir la resistencia del suelo a la penetración expresando como la fuerza por unidad de área de sección transversal de la base de cono. El penetrómetro de cono ha sido automatizado y modificado para incrementar la tasa de adquisición de datos y evaluado para producir mapas de la resistencia del suelo (Clark, 1999; Rapper, 1999; Price, 2002). Varios autores han desarrollado un sistema de penetrómetro basado en Sistemas de Posicionamiento Global Diferencial (DGPS) montado sobre el tractor utilizado para cuantificar la resistencia del suelo a la penetración de manera geo-referenciada (Boon, 2005).

En la última década, la integración de sensores con sistemas de Navegación Global por Satélite (GNSS) han permitido obtener mediciones en tiempo real con una precisión de su ubicación de centímetros y han mejorado significativamente el volumen y la precisión espacial de los datos necesarios para la AP (Wilson, 2000; Pérez, 2011). Los receptores GNSS son las tecnologías fundamentales de la AP donde la información de la posición es un requisito para la aplicación de tecnologías para el manejo del cultivo de sitio específico, tales como: el monitoreo de rendimiento, muestreos de suelo o aplicación de variable de insumos, las cuales se llevan a cabo con suficiente precisión con los sistemas diferenciales (DGPS) y sistemas de corrección de posición de tiempo real (RTK-GPS).

4.5.1. Resistencia a la penetración

Se observa que a una profundidad 10 a 30 cm ejerce poco resistencia a la acción de penetrómetro, sin embargo a los 30 cm comienza a notarse una ligera tendencia a aumentar se nivel de compactación, por ende si tenemos mayor compactación el esfuerzo tangencial aumenta (Núñez, 2010).

La compactación de los suelos puede ser evaluada a través de varios parámetros. La medida de la resistencia mecánica a la penetración (RP) es una vía sencilla para detectar los cambios en el perfil que pueden relacionarse con la exploración de las raíces (Silva, 2003).

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. El incremento de la resistencia mecánica a la penetración de raíces hasta valores referidos como limitantes ($> 2\text{MPa}$) (Tormena, 1999) conduciría a la obtención de formas más redondeadas y tamaños regulares de la raíz reservante que promuevan la calidad postcosecha del cultivo. Dada la necesidad de evaluar estos efectos en el cultivo de batata, se planteó en este trabajo caracterizar la resistencia mecánica a la penetración bajo distintos sistemas de labranza y densidades de siembra y, determinar la influencia de esta variable sobre la forma de la raíz reservante del cultivo batata. 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 (Nacci y Pla, 1992).

La dureza del suelo se expresa en kg. cm^{-2} o en kPa, se mide con la ayuda de aparatos llamados penetrómetros o durómetros. Estos han sido creados una serie de aparatos de diferentes principios de trabajo y forma de ser accionados, tales como mecánicos, dinámicos, hidráulicos, eléctricos, de sondas de neutrones, unos para ser operados por el hombre y otros montados sobre tractores con una sola unidad y ser operados por el hombre y otros montados sobre tractores con una sola unidad y en ocasiones con varias unidades para aumentar la productividad del trabajo y obtener una información (precisión) de la dureza del suelo al cual se le quiere determinar debido a las grandes variaciones que presenta en sus diferentes lugares por tratarse de un cuerpo no homogéneo tanto en su extensión como en su profundidad (Padrón 2005). La evaluación en campo del penetrómetro muestra la profundidad y los puntos donde se localizan las áreas compactadas del suelo evaluado, dando una mayor confiabilidad al agricultor (Jiménez, 2011).

En la figura (4.10), se muestran los resultados obtenidos y mapeados en la evaluación en campo, muestra en tiempo real tanto la demanda de fuerza para la resistencia a la penetración del suelo como la profundidad donde se localiza las áreas compactadas (Salas, 2013).

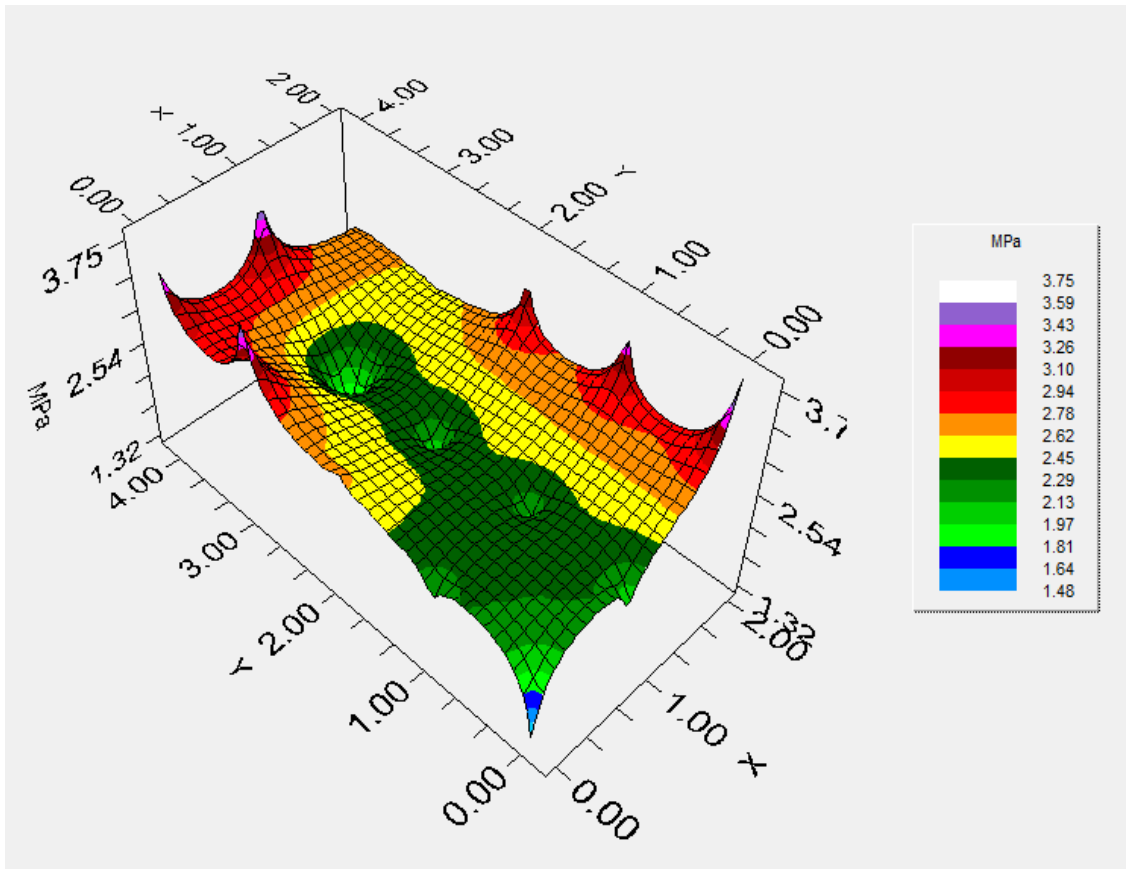


Figura 4.10 Mapa de resistencia a la penetración en 3D (Salas, 2013)

4.5.2. Sensores de medición de distancia

Los sensores de distancia y transductores de distancia, están pensados para realizar la medida de distancia lineal o desplazamiento lineal de una forma automatizada, ya que proporcionan una señal eléctrica según la variación física, en este caso la variación física es la distancia.

Los rangos de medida disponibles son muy diversos, según el tipo de sensor de distancia empleado. Así pues hay modelos que tienen rangos de unas pocas micras y otros modelos que pueden llegar a medir cientos de metros. En función al rango requerido, el formato del sensor varia, siendo más o menos voluminoso, con mayor o menor protección IP, etc., (Sensing, 2014).

Podemos decir que los sensores de proximidad son de una gran ayuda al mundo de la automatización pues su gama de aplicaciones es bastante grande y en aumento. El sensor de proximidad más usado en la robótica es el sensor infrarrojo, perteneciente

a la familia de los sensores fotoeléctricos. Es la más usada debido a su bajo costo, a su fácil uso, su fácil implementación y a su amplia gama de aplicaciones de automatización (Robótica, 2010).

4.5.3. Sonar LV-MaxSonar-EZ1

Es especial 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 a 645 cm con una resolución de 1 cm. Este sensor puede ser alimentado con voltajes entre 3,3 y 5 VDC ver figura (4.14).

La información puede ser recogida a través de un uso de estos tres métodos - analógico, serie o PWM – los cuales están activos al mismo tiempo. La salida analógica produce una tensión proporcional a la distancia medida, con una sensibilidad de $(VCC/1024) V \text{ cm}^{-1}$. La interfaz serie es simple y con formato a RS-232, con voltajes que van desde 0 a VCC y el terminal de configuración 9600-8-N-1. Por último, el PWM genera una representación de ancho de pulso con un factor de escala de 58 $\mu\text{s cm}^{-1}$ (MaxBotix, 2014).

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 serie RS232-9600 bps
6. Salida analógica- 10 mV μV^{-1}
7. Salida PWM- 47 $\mu\text{s} \mu\text{V}^{-1}$



Figura 4.11 Figura Sonar LV-MaxSonar-EZ1 (MaxBotix, 2014).

4.6. Mecánica de suelos

El suelo constituye un recurso esencial para el desarrollo económico-social y es el sostén físico y químico de todos los ecosistemas terrestres (Gonzales, 2009)

Las propiedades físicas de los suelos, determinan un 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 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 influye en el crecimiento de las plantas, en qué medida y como la actividad humana puede llegar a modificarlas, y a comprender la importancia de mantener las mejores condiciones físicas del suelo posibles.

Para determinar el tipo granulométrico o clase textural de un suelo, se recurre a varios métodos. Se utilizan cada vez más los diagramas triangulares, siendo el triángulo de referencia un triángulo rectángulo o un triángulo equilátero. Se usa actualmente, de un modo casi unánime, un triángulo equilátero, cada uno de sus lados a un eje graduado de 10 en 10, de 0 a 100, sobre el cual se transporta la cantidad del elemento que representa; en general un lado del triángulo corresponde a la arcilla, otro al limo, y el tercero a la arena, ver figura (4.11) (Rucks et al., 2004).

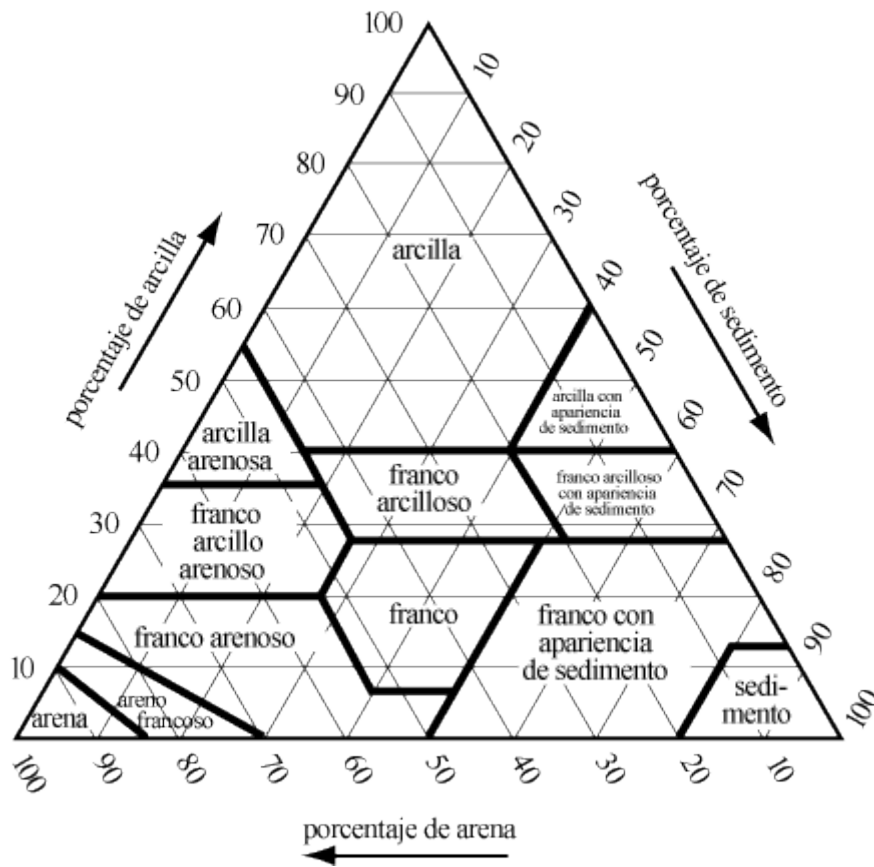


Figura 4.12 El interior del triángulo está dividido en casillas, cada una de ellas representa una clase textural de suelo caracterizado por las proporciones de uno o de dos elementos dominantes; suelos arenosos, limosos, arcillosos, arcillo arenosos, etc. (Rucks, 2004)

Se utiliza el triángulo de la siguiente manera: cuando se dispone del análisis granulométrico de un suelo, su tenor en arcilla, en limo y en arena, determina un punto que se sitúa en el triángulo, en el interior de una casilla y que permite identificarlo y darle un nombre asimilándolo a la clase textural representada por esa casilla por ejemplo, franco, arcillo arenoso, etc. Ver cuadro (4.2) (Rucks, 2004).

Cuadro 4. 2 Clase textural representada por esa casilla por ejemplo, franco, arcillo arenoso, etc. (Rucks, 2004).

Términos generales	Clases texturales
	Arenosos

	Suelo de textura gruesa	Arenosos-Francos
Suelo arenoso	Suelo de textura moderadamente gruesa	Franco-Arenosos Franco-Arenosos finos Franco-Arenosos muy finos
SUELO FRANCO	Suelo de textura media	Franco Franco-Limoso Limoso
	Suelos de textura moderadamente fina	Franco-Arcilloso Franco-Arcillo Arenoso Franco-Arcillo Limoso
Suelo arcillosos	Suelos de textura fina	Arcillo-Arenoso Arcillo-Limoso Arcilloso

La utilización de un triángulo, llamado de texturas no conduce más que a una primera aproximación en la interpretación del análisis de un suelo. En conclusión, tales triángulos, permiten, en un principio, situar un suelo en un conjunto caracterizado por propiedades texturales; su empleo contribuya a fijar las ideas y normalizar en alguna medida de interpretación de los resultados del análisis granulométrico. (Rucks, 2004). Dada la complejidad del sistema suelo muchos métodos (físicos, físico-químicos, químicos, biológicos) son utilizados para la evaluación de su comportamiento y propiedades. Desde su mismo surgimiento la ciencia del suelo ha utilizado los métodos físicos de investigación, muchos de los cuales fundamentan las técnicas tradicionales (Cabrera, 2008).

Las fuerzas que se oponen al trabajo de los aperos es lo siguiente:

- Cohesión o resistencia que ofrece las partículas a su separación. La cohesión entre las partículas del suelo se debe a la atracción eléctrica entre ellas, a medida que las partículas se humedecen, el agua en forma de película tiende a separarlas, reduciendo su valor.
- Adherencia o resistencia que oponen las partículas a deslizarse entre sí y sobre los aperos. La adherencia del suelo a los aperos se da por fenómenos de tensión superficial. Hasta cierto nivel de humedad el suelo se adhiere más a los útiles de trabajo, aumentando su resistencia al laboreo, la cual crece hasta un valor de humedad tal que el suelo deja de ser un medio sólido.

Ambas fuerzas varían en función de la humedad del suelo. La suma de la cohesión y de la adherencia es la resistencia que opone un suelo para su labranza y tiene que ser vencida por los aperos de laboreo.

En la figura (4.4) se representan en un diagrama la variación de ambas fuerzas en función de la humedad, se obtiene un esquema como el que representa a continuación:

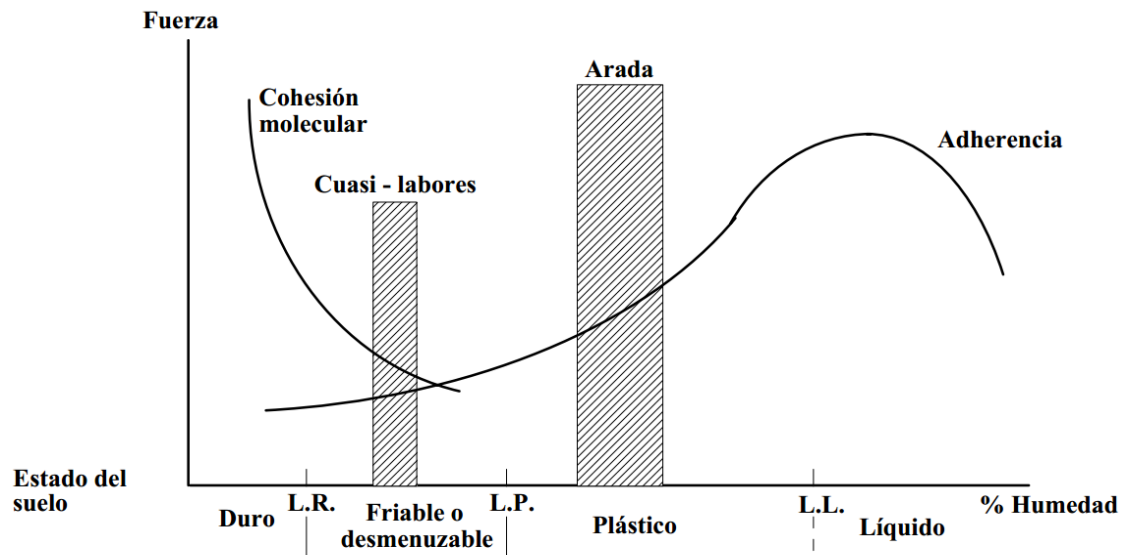


Figura 4.13 Variación de las fuerzas resistentes del suelo en función de la humedad (Universidad de Castilla-la Mancha 2004)

En el diagrama anterior se presentan puntos de interés agronómico como:

Límite de retracción (L.R).

Límite de plasticidad (L.P).

Límite líquido (L.L).

Estos límites marcan cuatro estados del suelo:

Duro.

Fiable o desmenuzable.

Plástico.

Líquido.

Para realizar racionalmente las labores el conocimiento de este diagrama en un determinado tipo de suelo de gran interés pues permite predecir su comportamiento (Universidad de Castilla-la Mancha, 2004).

Es importante que la descripción del suelo sea hecha exhaustivamente; esto sirve como base para la clasificación del suelo y la evaluación del sitio, así como para realizar interpretaciones sobre los génesis y funciones medioambientales del suelo.

Los suelos son afectados por las actividades humanas, como la industrial, la municipal y la agrícola, que a menudo resulta en la degradación del suelo y pérdida o reducción de sus funciones.

El color del suelo refleja la composición así como las condiciones pasadas y presentes de óxido-reducción del suelo. Está determinado generalmente por el revestimiento de partículas muy finas de materia orgánica humedificada (oscuro), óxido de hierro (amarillo, pardo, anaranjado y rojo), óxidos de manganeso (negro) y poros, o puede ser debido al color de la roca parental (FAO 2009).

Según las propiedades físicas y químicas de los suelos la densidad que hace máxima la producción, varía entre límites que van de 0.9 a 1.4 g/cm^3 . (Universidad de Castilla-La Mancha 2004).

V. METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta los materiales y equipos que se emplearon durante el desarrollo de este trabajo, fueron diferentes tanto para la Resistencia de Roturación, Resistencia a la Penetración del Suelo y las muestras de suelos que se tomaron, los cuales se describe a continuación:

5.1. Materiales, Equipos y Software

Tractor. Para el desarrollo de este trabajo se utilizó un tractor New Holland modelo 6810 y una velocidad nominal del motor de 2070 rpm, instrumentado con línea de energía de alimentación 110 V para instalar una computadora de escritorio y un sistema de adquisición de datos (figura 5.1).



Figura 5.1 Tractor NEWHOLLAND 6810

Carro porta-sensores. En este sistema se acoplaron los diferentes sensores de RPS y RRS además se colocaron contrapesos para contrarrestar la fuerza normal en las pruebas. Figura (5.2).



Figura 5.2 Carro porta-sensores

Dos sensores Transductores octagonal de anillo extendido: Para el registro de la fuerza de reacción del suelo (F_x) a profundidades de 0.20-0.30 m y 0.30-0.40 m. Figura (5.3).



Figura 5.3 Transductor octagonal extendido amarillo-rojo (F_x) y verde-azul (F_x)

Cinceles. Estos instrumentos su finalidad es roturar el suelo, tal es el caso de un cincel angular con alas, haciendo un trabajo de roturación del suelo de 0-0.20 m, y los sensores (cinceles rectos) van a una profundidad de 0.20-0.30 m y de 0.30-0.40 m. figura (5.4).



Figura 5.4 Dos cinceles rectos y un angular con alas

Sonda. Este instrumento acoplado al penetrómetro digital, su trabajo es medir la profundidad a la que penetra. Figura (5.5).



Figura 5.5 Sonda del penetrómetro

Penetrómetro digital. Integrado por sensor de fuerza de anillo simple con capacidad de 10 kN, un sensor de medición de profundidad con Sonar LV-MaxSonar-EZ1 circuito de amplificadores AD620 en serie y un filtro pasa bajo para disminución de ruido, y una sonda de punta cónica de área superficial de 0.001053253 m^2 , como se observa en la figura (5.6).



Figura 5.6 Penetrómetro digital

Sistemas de adquisición de datos

Geo-posicionador. El sistema de medición consta de equipo electrónico para captura de información, sistema de posicionamiento global, (AgDGPS) Trimble (132), y equipo sensorial para detectar el estado físico-mecánico del suelo geo referenciado por medio específico. Figura (5.7).



Figura 5.7 Sistema de posicionamiento global, (AgDGPS) Trimble (132)

Computadora. Se utilizó una computadora de escritorio del departamento de maquinaria (marca Dell con un procesador genuino Intel, con una memoria RAM de 512MB, y una capacidad en el disco duro de 34.1 GB). Figura (5.8).



Figura 5.8 Computadora Dell

Convertidor analógico-digital LogBook/360. Es un módulo interconectado entre el DBK-34 A y la computadora por medio del cable de puerto paralelo, este convierte las señales del amplificador de analógicas a digital y las manda a la computadora por medio del software LogView. En este módulo es integrado por seis voltajes diferenciales. Con una ganancia de 0.01-10 y con una velocidad de muestreo de 25-625 E3 por segundo. Este sistema permite almacenar en forma instantánea los datos en la computadora. Figura (5.9).



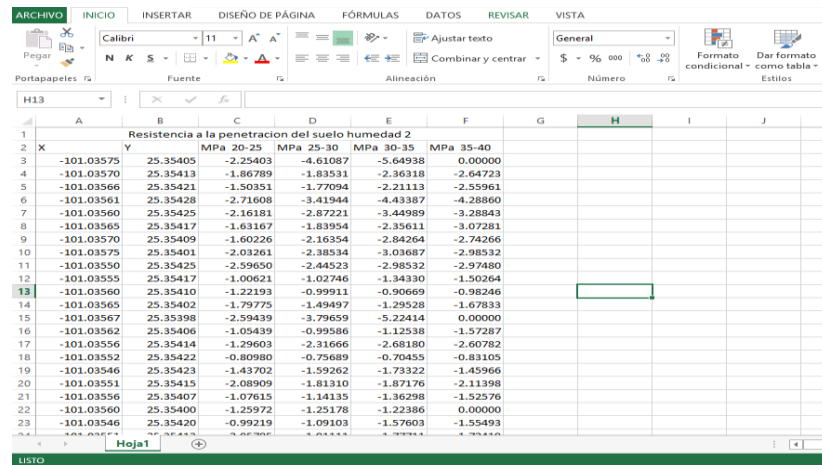
Figura 5.9. Convertidor analógico-digital LogBook/360 y DBK-43 A

Amplificador – acondicionador de señal DBK43A, con ocho canales de entrada, con ganancia de 100 a 1250x (ϵ), fabricado por lotech, Inc. usado para amplificar la

señal del (TOE) y proporcionar una salida estandarizada de voltaje. Se suministra el voltaje de excitación al sensor en un rango de 1-10 V y 100 mA.

Software

Excel. Esta herramienta se utilizó para la captura de datos recopilados en campo y también para revisar unas gráficas. Figura (5.10).



The screenshot shows the Microsoft Excel 2013 interface. The active worksheet is titled 'Hoja1'. The data table is as follows:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2	X	Y	MPa 20-25	MPa 25-30	MPa 30-35	MPa 35-40				
3	-101.03575	25.35405	-2.25403	-4.61087	-5.64938	0.00000				
4	-101.03570	25.35413	-1.86789	-1.83511	-2.36318	-2.64723				
5	-101.03566	25.35421	-1.50351	-1.77094	-2.21113	-2.55961				
6	-101.03561	25.35428	-2.71608	-3.41944	-4.43387	-4.28860				
7	-101.03560	25.35425	-2.16181	-2.87221	-3.44989	-3.28843				
8	-101.03565	25.35417	-1.63167	-1.83954	-2.35611	-3.07281				
9	-101.03570	25.35409	-1.60226	-2.16354	-2.84264	-2.74266				
10	-101.03575	25.35401	-2.03261	-2.38534	-3.03687	-2.98532				
11	-101.03550	25.35425	-2.59650	-2.44523	-2.98532	-2.97480				
12	-101.03555	25.35417	-1.00621	-1.02746	-1.34330	-1.50264				
13	-101.03560	25.35410	-1.22193	-0.99911	-0.90669	-0.98246				
14	-101.03565	25.35402	-1.79775	-1.49497	-1.29528	-1.67833				
15	-101.03567	25.35398	-2.59439	-3.79659	-5.22414	0.00000				
16	-101.03562	25.35406	-1.05439	-0.99586	-1.12538	-1.57287				
17	-101.03556	25.35414	-1.29603	-2.31666	-2.68180	-2.60782				
18	-101.03552	25.35422	-0.80980	-0.75689	-0.70455	-0.83105				
19	-101.03546	25.35423	-1.43702	-1.59262	-1.73322	-1.45966				
20	-101.03551	25.35415	-2.08909	-1.81310	-1.87176	-2.11398				
21	-101.03556	25.35407	-1.07615	-1.14135	-1.36298	-1.52576				
22	-101.03560	25.35400	-1.25972	-1.25178	-1.22386	0.00000				
23	-101.03546	25.35420	-0.99219	-1.09103	-1.57603	-1.55493				

Figura 5.10 Software Microsoft Excel 2013

ArcView Gis 3.2. Esta herramienta nos sirvió para visualizar, explorar, consultar y analizar los datos en campo. Figura (5.11).

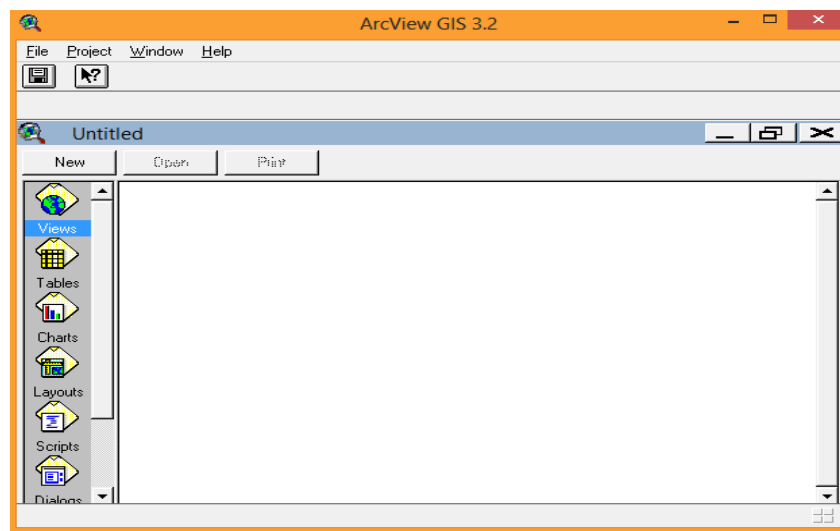


Figura 5. 11. Software ArcView Gis 3.2

5.2. Fase de laboratorio

5.2.1. Acondicionamiento de carro porta-sensores

En este sistema se colocó un cilindro hidráulico en la parte derecha del carro- porta sensor, instalando en la punta del vástago del cilindro hidráulico, un sensor de resistencia a la penetración.

En los cinceles se acondicionó con acoples, para que lleve dos cinceles rectos y un cincel semicurvo con alas.

El primer cincel va a una profundidad de 0.20 m con alas de 0.15 m de ancho de roturación.

El segundo cincel lleva un acople para colocar el sensor de anillo extendido, en ello llevara un cincel recto con un ancho de 0.75', rompiendo a una profundidad de 0.20-0.30 m, tomando la fuerza con sensor de anillo extendido.

En la parte trasera del carro-porta sensor, lleva otro acople para el cincel recto con un ancho de 0.75', va a una profundidad de 0.30-0.40 m, estos llevando unos pernos de ajuste lateral para un mejor alineación.

En el carro-porta sensores también se colocaron 11 pesos (siete pesos con masa de 48 kg y cuatro pesos de 40 kg), esto para contrarrestar la fuerza a la penetración del suelo.



Alineación de sensores

Figura 5.12 Acondicionamiento del carro porta-sensor

5.2.2. Calibración de los sensores

5.2.2.1 Resistencia a la roturación suelo (RRS).

Para la calibración de los dos sensores octagonales de anillo extendido se realizó una conexión para cada uno de ellos a un amplificador DBK-43 A, correspondientes a los canales asignados, con la cual para ajustar o configurar lo voltajes a la que de estar cada sensor. Cuadro (5.1).

5.2.2.2 Resistencia a la penetración suelo (RPS).

Para la calibración del sensor del penetrómetro también se realizaron dos conexiones: el primer sensor para medir la distancia por ultrasonido se conectó directamente al amplificador DBK-43 A en los canales asignados y el sensor de fuerza se conectó de misma manera al amplificador con su respectivo canal.

Las fuerzas nos sirven para conocer las áreas compactadas y sensor de distancia nos indica a que profundidad esta la capa compactada el suelo. Cuadro (5.1).

Cuadro 5.1 Valores y canales para la conexión de los sensores RPS Y RRS a la escala del acondicionador de señales DBK-43 A.

Sensor	Cables	Canal	Voltaje de excitación	Gain	Scaling
Sensor 1	Rojo-Am Fx	CH 0	5.5	4.5	4.5
Sensor 2	Ver-Azul Fx	CH 5	5.5	4.5	4.5
Penetrómetro	Penetrómetro	CH 2	9.5	4.5	4.5
Sonar	Sonar Fx	CH 7	9.5	4.5	4.5

5.3. Fase de campo

En campo se evaluaron variables tanto para la resistencia de roturación del suelo (RRS) como para la resistencia a la penetración del suelo (RPS), con el fin de determinar la existencia de una correlación entre la RRS contra la RPS, trabajando

con tres diferentes humedades del suelo y la profundidad de cada cincel de roturación. Se trabajó con un cincel recto a una profundidad de 0.30 metros y el otro cincel recto a una profundidad de 0.40 m, obteniendo la fuerza en cada sensor.

Con respecto a la resistencia a la penetración del suelo, la profundidad máxima de trabajo con este sensor fue de 0.40 metros a penetrar determinando la magnitud y localización de las áreas compactadas. El sensor sonar de distancia indica a que profundidad está la capa compactada del suelo.

5.3.1. Ubicación

El levantamiento de datos se realizó en una de las parcelas de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) llamada jardín hidráulico con dimensiones de 40 m de ancho y 75 m de largo, con coordenadas latitud de 29 °11 '34.7 N, longitud de 112 °28 '20.7 O y altitud de 1766 msnm.



Figura 5.13 Parcela en el jardín hidráulico (UAAAN)

5.3.2. Levantamiento de datos

5.3.2.1. Nivelación del carro porta-sensores (RR)

Después de montar los tres cinceles con diferentes profundidades, se realizó una primera prueba con el tractor llegando a las profundidades que se requiere, el primer

cincel con ala se entierra a una profundidad de 0.20 m, el segundo cincel recto tiene un rango de profundidad de 0.20-0.30 m y el tercer y último cincel se entierra a un rango de profundidad de 0.30-0.40 m. Se nivela el carro porta-sensores horizontal y verticalmente haciendo ajuste en el brazo del sistema de enganche del tercer punto, para después activar el software DaqView para el registro de los datos.



Figura 5.14 Calibración y nivelación del carro porta-sensor (RRS)

5.3.2.2. Distribución de las parcelas

Para el primer levantamiento de datos se dividieron en tres bloques las camas de la parcela, cada bloque contiene tres líneas con un ancho de separación de 1.70 metros, sumando con un total de nueve líneas, en cada línea se registraron 2000 datos con el programa de LogView. Trabajando con una aceleración de 1800 RPM y una velocidad del tractor en tercera baja. Al término de cada línea los datos deben de ser convertidos con el LogBook 360 para poder analizar estos datos en el programa de Excel, donde nos muestra la gráfica de los dos sensores activados.

5.3.2.3. Nivelación del carro-porta sensor (RP)

Para la segunda etapa del levantamiento de los puntos de resistencia a la penetración, antes de empezar a tomar los datos, se realizó la conexión del sensor de fuerza y de sensor de distancia, al término de esto, se llevó a cabo la nivelación del carro-porta sensor horizontal y verticalmente, ajustando los brazos del sistema de enganche el

tercer puntos, como también las ruedas del carro-portal sensor, para una mejor nivelación la sonda debe de estar al nivel de suelo. Y por último activar el LogView, para estar seguro con la calibración de los dos sensores.



Figura 5.15 Calibración y nivelación del carro porta-sensor (RPS)

5.3.2.4. Distribución de los puntos y líneas.

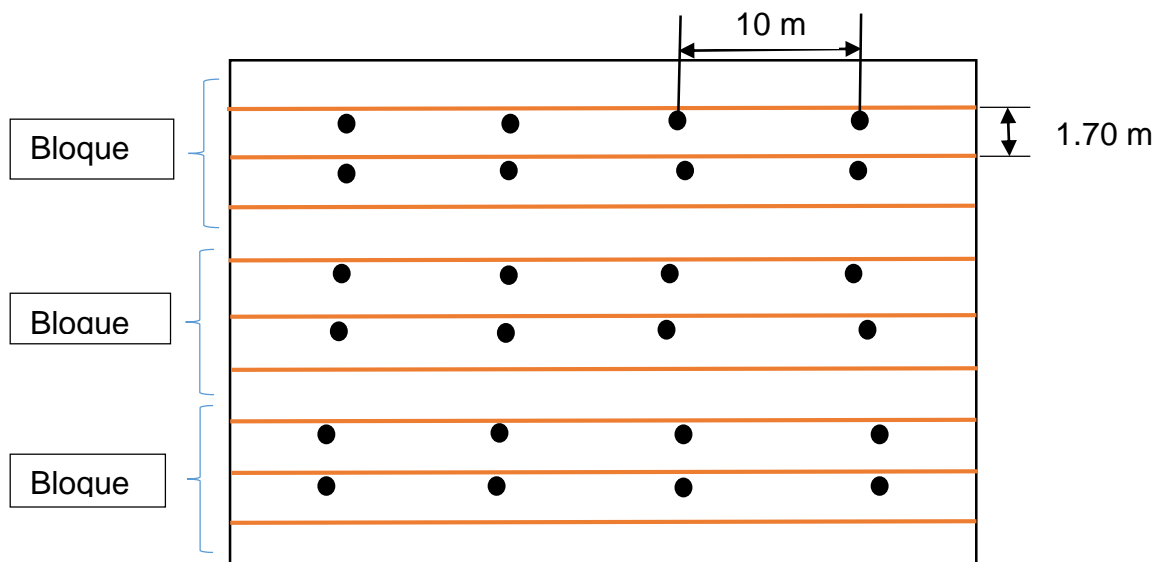


Figura 5.16 Distribución de líneas con separación de 1.70 metros y distribución de punto a punto con distancia de 10 metros

Ya trazadas las nueve líneas, divididas en tres bloques de cada cama de la parcela, se realizaron los levantamientos de los puntos, estabilizando el tractor. En cada bloque se tomaron ocho lecturas, para un total de 24 entre los tres bloques, la distancia de punto a punto fue de 10 metros.

Humedad

Se tomaron tres humedades: humedad de referencia (H1), humedad pasando cuatro días de irrigar (H2) y humedad pasando 6 días de irrigar (H3). Para la H2 Y H3 el riego fue de 8 horas para cada una de las pruebas, se alcanzó una humedad a la profundidad de 40 cm. Para H1 se tomaron 3 muestras de suelo de suelo por línea dando un total de 9 muestras de suelo por cada humedad; se colocaron en la estufa de maquinaria durante 24 horas con una temperatura de 110 °C para conocer el peso del suelo seco. La cual, se utilizó el método gravimétrico para conocer el porcentaje de humedad representando así la ecuación (1).

$$\%H = \frac{PSS - PSH}{PSS} \times 100 \qquad \text{Ecuación 1}$$

En donde:

PSS: Pesos del suelo seco

PSH: Peso del suelo húmedo

%H: Porcentaje de humedad

VI. RESULTADOS

6.1. Partes del equipo

Con el equipo mostrado en la Figura (6.1) se realizó el levantamiento de los datos en campo, integrado por un tractor NEWHOLLAND modelos 6810, un carro porta-sensores y un sistema de adquisición de datos para la toma de información de los sensores de la Resistencia de roturación y Resistencia a la penetración del suelo. A continuación se menciona las partes del carro porta sensores (figura 6.1).



Figura 6. 1 Tractor completo y el carro porta-sensor

Cuadro 6.1 Enumeración de las partes de carro porta-sensor.

1 geo- posicionador	2 Sensor 1 (RRS)	3 Sensor 2 (RRS)	4 Sonda del penetrómetro	5 Reflectante
6 Computadora DELL	7 Penetrómetro digital	8 Cincel (0.40 m)	9 Cincel (0.30 m)	10 Contrapesos

6.2. Generación de mapas

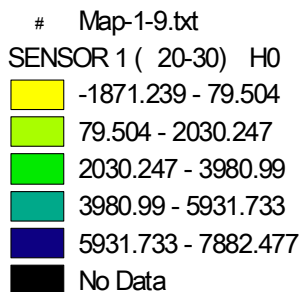
Después de recopilar los datos en campo, se hace una interpretación IDW generando los mapas de diagnóstico con el programa ArcView 3.2 a diferentes porcentajes de

humedad del suelo y profundidades que se trabajando, haciendo una comparación entre la Resistencia de Roturación del Suelo (RRS) contra la Resistencia de la Penetración del Suelo (RPS).

6.2.1. Resistencia a la roturación del suelo comparado con Resistencia a la penetración del suelo con H1 promedio de 11.4%.

En estos dos primeros mapas se observa el comportamiento de la Resistencia a la penetración del suelo en un rango de 2.9-4.3 MPa que corresponde a un esfuerzo de roturación en un rango de 2030.2-3980.9 N, es decir, el área de estos dos mapas es similar, a pesar de contar con dos diferentes sistemas y magnitudes, esto se representa de la siguiente manera: de color verde claro para la RRS y el área de color naranja oscuro para la RPS, a continuación se muestra el área sombreada (figura 6.2), y también se observa el área compactada que existe en los dos sistemas que es en los extremos de la parcela o del bloque.

RRS SENSOR 1



RPS MPa (20-25 cm)

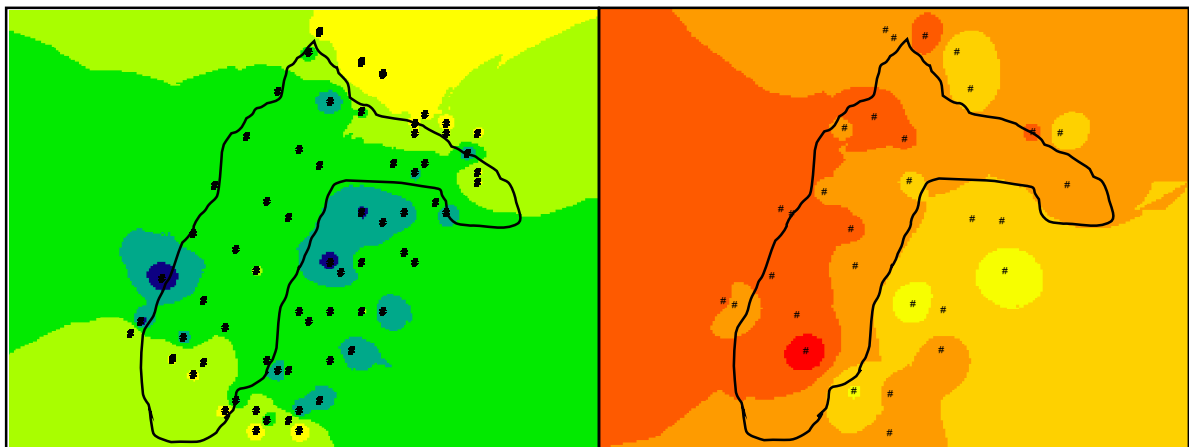
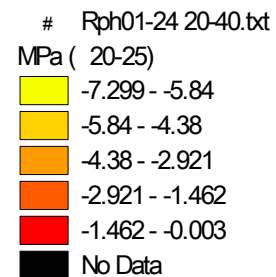


FIGURA 6.2 Resistencia a la roturación del suelo (sensor 1) y resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.20-0.25 m

6.2.2. Resistencia a la roturación del suelo comparado con Resistencia a la penetración del suelo con H1 promedio del 11.4%.

En los dos siguientes mapas se observa la resistencia a la penetración del suelo equivalente en un rango de 2.4-3.5 MPa, existe una similitud significativa de área para la resistencia de roturación del suelo con una fuerza equivalente a 2030.2-3980.9 N, y donde también nos muestra que existe poca área de compactación de suelo trabajando a una profundidad de 0.25-0.30 m con el sensor 1 para la RRS. Esto se identifica con los siguientes colores: para la RRS el área esta sombreada de color verde claro y para la RPS esta sombreada de color naranja, como se muestra en la figura (6.3).

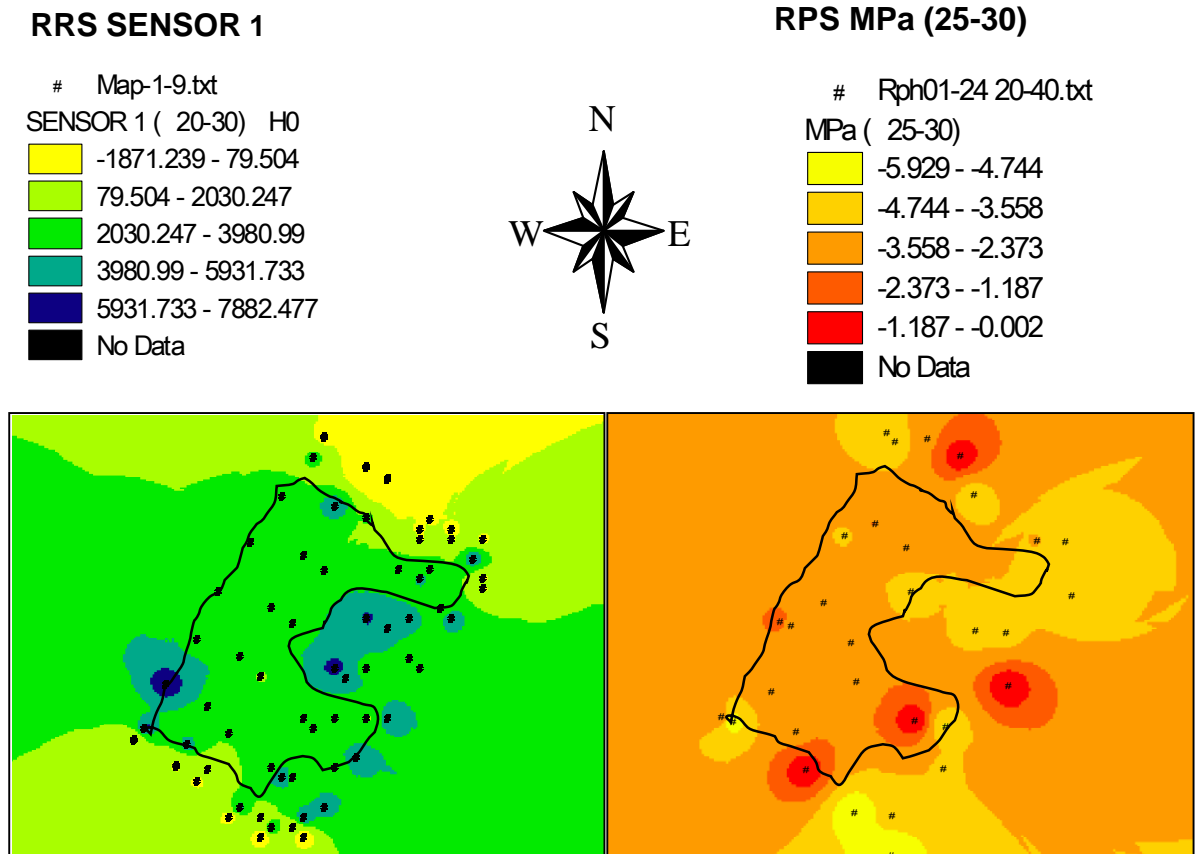


Figura 6.3 Resistencia a la roturación del suelo (sensor 1) y resistencia la penetración del suelo con profundidad de 0.25-0.30 m

6.2.3. Resistencia a la roturación del suelo comparado con Resistencia a la penetración del suelo (profundidad 0.20-0.30 m) con H1 promedio del 11.4%.

Para la Resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.20-0.30 m el valor preponderante de resistencia es de 3-3.9 MPa para un valor de fuerza de la RRS de 2030.2-3980.9 N, (ver Figura 6.4).

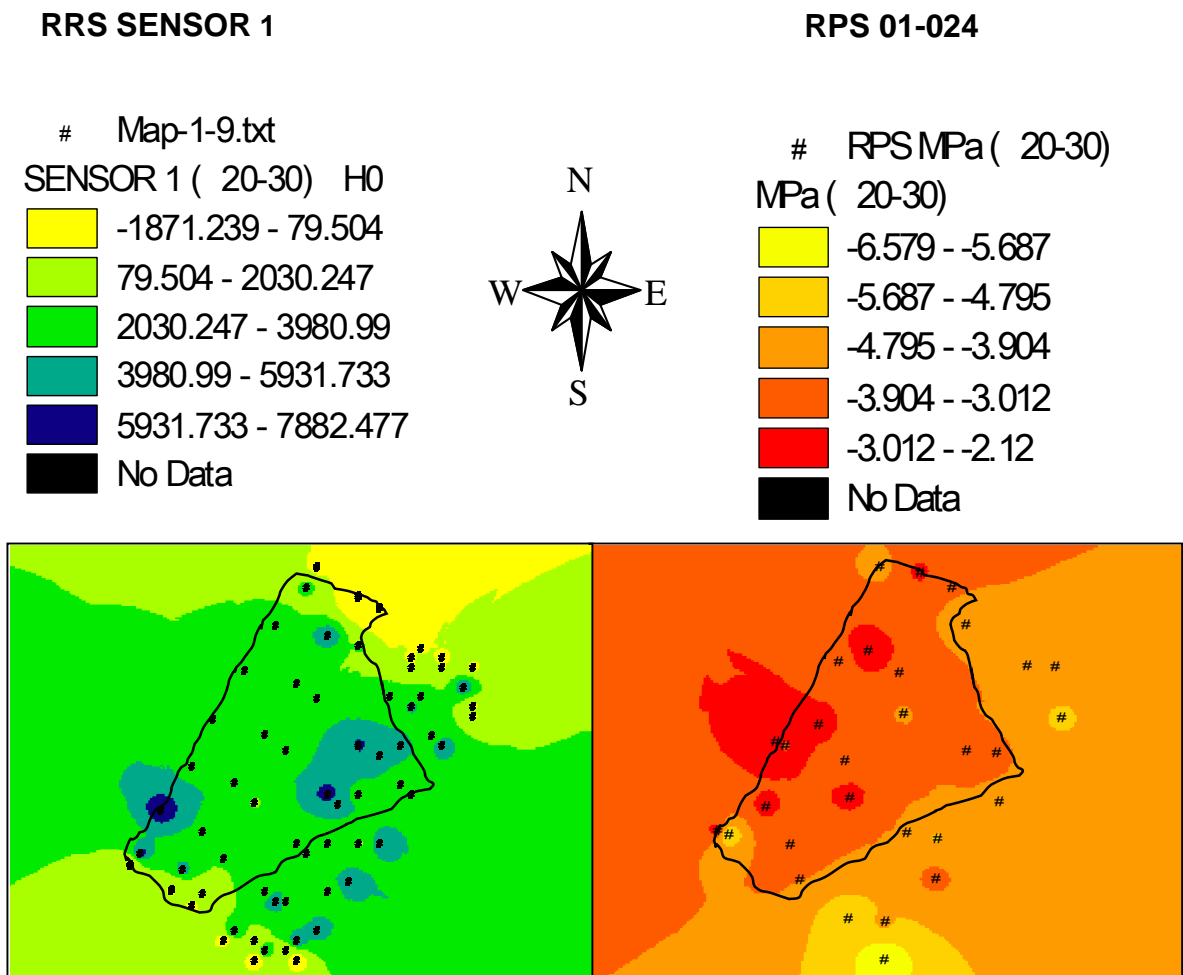
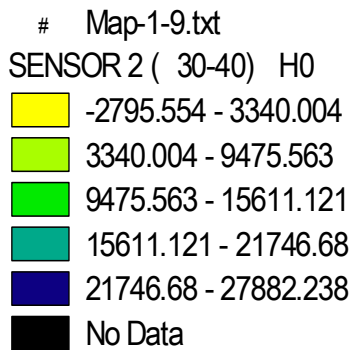


Figura 6.4 Resistencia a la roturación del suelo (sensor 1) y resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.20-0.30 m

6.2.4. Resistencia a la roturación del suelo (sensor 2) comparado con resistencia a la penetración del suelo con humedad promedio del 11.7% (suelo seco).

El comportamiento de estos dos sistemas que se observa en los mapas para la resistencia a la penetración con una rango de profundidad de 0.30-0.35 m que es equivalente a un rango de 2.2-3.3 MPa que representa a una fuerza para la resistencia a la roturación del suelo con una profundidad de 0.30-0.40 m equivalente a 9475.5-15611 N, identificando con color naranja oscuro para la RPS y color verde claro para la superficie de la RRS y también mencionar las áreas más compactas que se encuentra en los extremos del bloque para los dos sistemas trabajando a una humedad promedio del 11.7%. (Figura 6.5).

RRS SENSOR 2



RPS MPa (30-35)

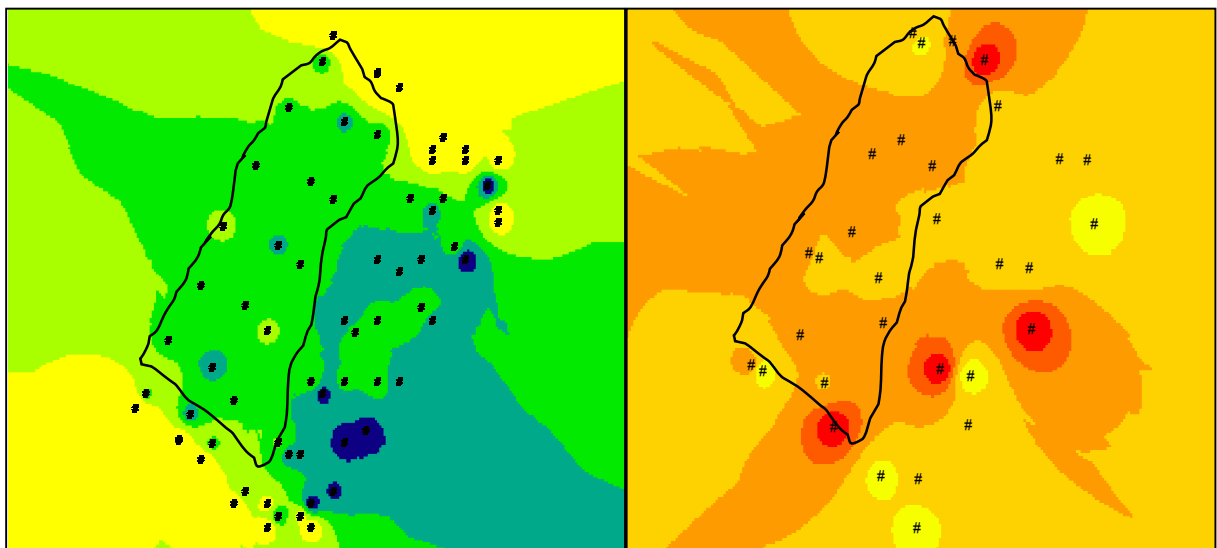
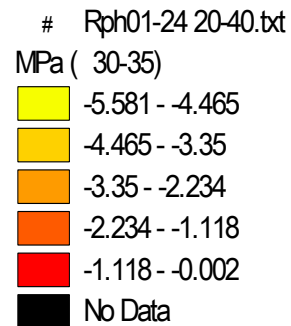


Figura 6. 5 Resistencia a la roturación del suelo (sensor 1) y resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.30-0.35 m

6.2.5. Resistencia a la roturación del suelo (sensor 2) comparado con resistencia a la penetración del suelo con H1 promedio igual a 11.7%.

Para la resistencia a la penetración del suelo con un rango de profundidad de 0.35-0.40 m se observa dos áreas separadas pero con mismo rango de resistencia equivalente a un rango de 3-4 MPa correspondiente a una fuerza equivalente a 9475.5-15611.1 N, esto quiere decir entre mas sea la profundidad el esfuerzo aumenta, la cual se trabajo con un porcentaje de humedad promedio del 14.7% (suelo seco), y para poder indentificar las áreas similares para estos dos sistemas se representa con color verde claro y color naranja claro, respectivamente. Figura (6.6).

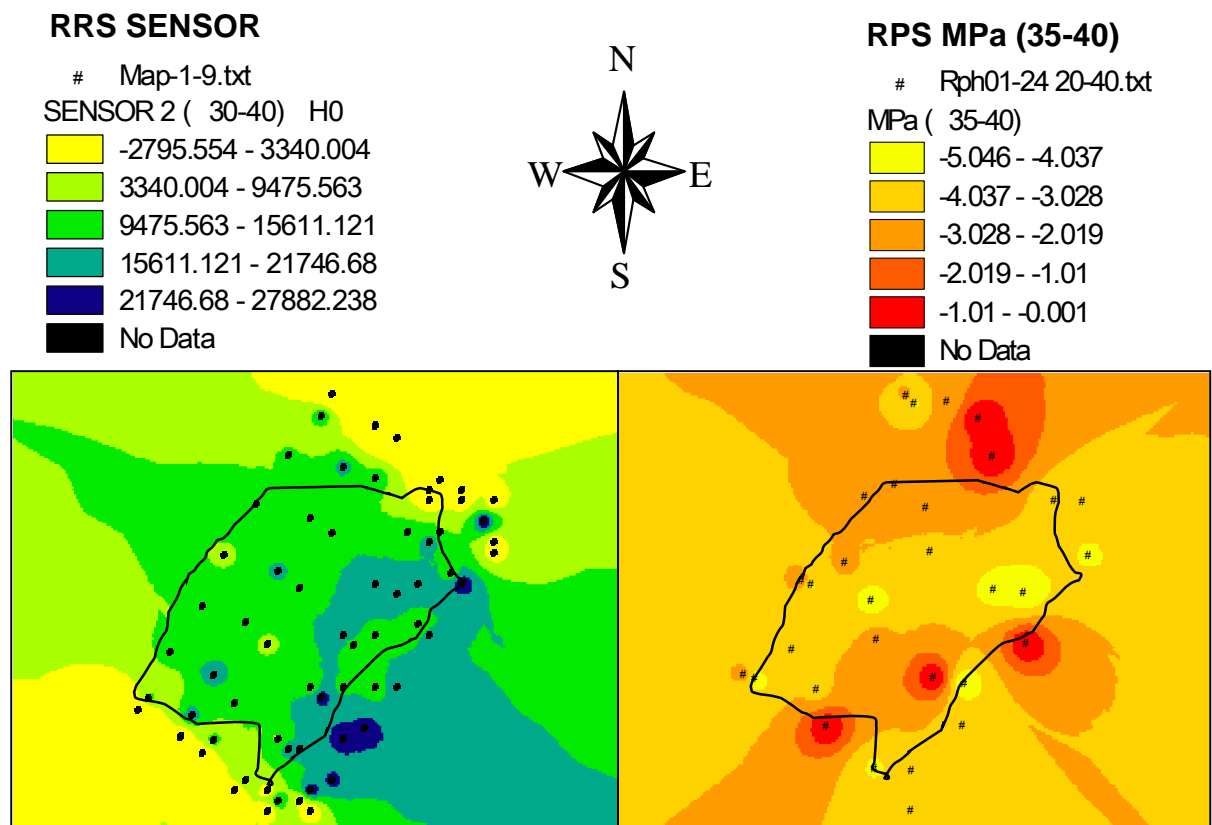


Figura 6.6 Resistencia a la roturación del suelo (sensor 2) y resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.35-0.40 m

6.2.6. Resistencia a la roturación del suelo (sensor 2) comparado con resistencia a la penetración del suelo con H1 promedio del 11.7%.

Para estos sistemas trabajando con la misma profundidad de un rango de 0.30-0.40 m respectivamente a la figura 6.7, existe una superficie mayor similar representado a la RPS equivalente a 3.4-4 MPa correspondiente a una fuerza equivalente a 9475.5 N que incrementa a 15611.1 N, también se observan unas partes del mapa que existe poca área compactada para ambos sistemas, trabajando con el mismo porcentaje de humedad promedio de 11.7% y se identifica las áreas similares con los mismos colores.

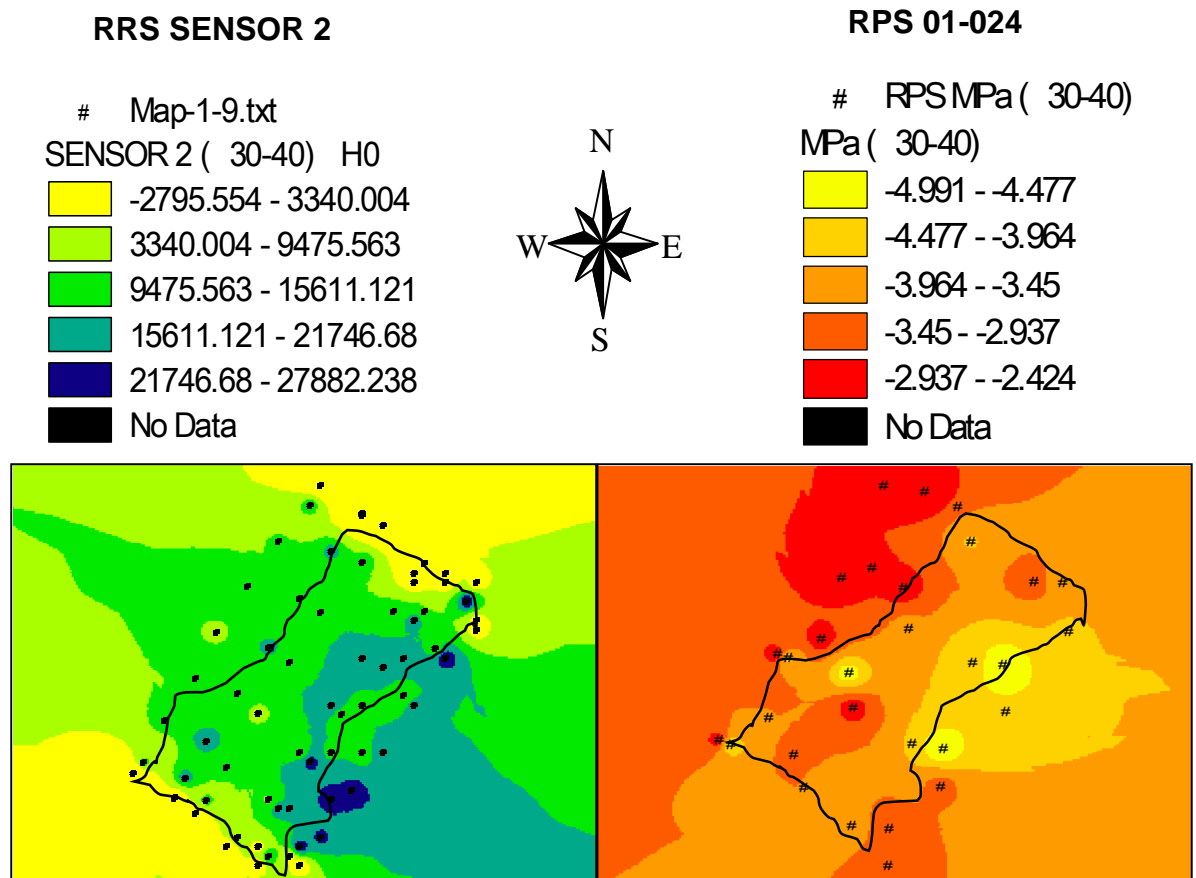


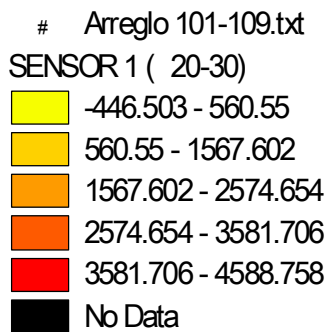
Figura 6.7 Resistencia a la roturación del suelo y Resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.30-0.40 m

6.2.7. Resistencia a la roturación del suelo (RRS) comparado con resistencia a la penetración del suelo (RPS) con H2 promedio del 16.3%.

En los siguientes mapas se observa el comportamiento de la Resistencia de roturación del suelo (sensor 1) con rango de profundidad de 0.20-0.30 m comparado con la

Resistencia a la penetración del suelo con rango de profundidad de 0.20-0.25 m equivalente a 1.2-2 MPa la cual corresponde a una fuerza equivalente a 1567.6-2574.6 N, donde existe una mayor similitud de área para los dos sistemas, de esta manera se puede identificar de colores las áreas, de color naranja claro, tenemos para la RRS y color café claro para la RPS, trabajando con un porcentaje de humedad promedio de 16.3% (suelo húmedo) ver figura (6.8).

RRS SENSOR



RPS MPa (20-25)

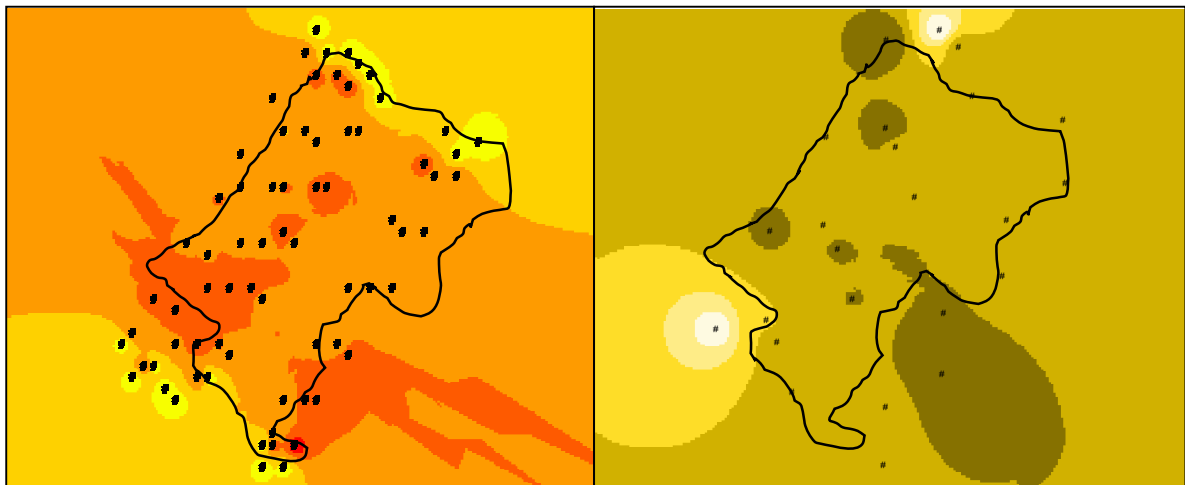
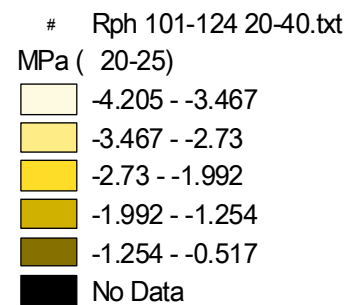


Figura 6.8 Resistencia a la roturación del suelo (sensor 1) y resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.20-0.25 m

6.2.8. Resistencia a la roturación del suelo (RRS) comparado con resistencia a la penetración del suelo (RPS) con H2 promedio del 16.3%.

Para estos dos sistemas de acuerdo a lo observado, el comportamiento para la Resistencia a la penetración del suelo la fuerza sobre el área es equivalente a 0.6-1.5 MPa donde corresponde a una fuerza igual a 2574.6-3581.7 N, la cual una parte de

estos dos sistemas son similares en cuestión de área y existen partes donde el suelo se encuentra compactada, como se observa en los dos mapas, de tal manera se puede identificar el área sombreada de color naranja claro para la RRS y con color café oscuro se observa el área que es similar para el otros sistema, se trabajó con un porcentaje de humedad promedio de 16.3% (suelo húmedo). Figura (6.9).

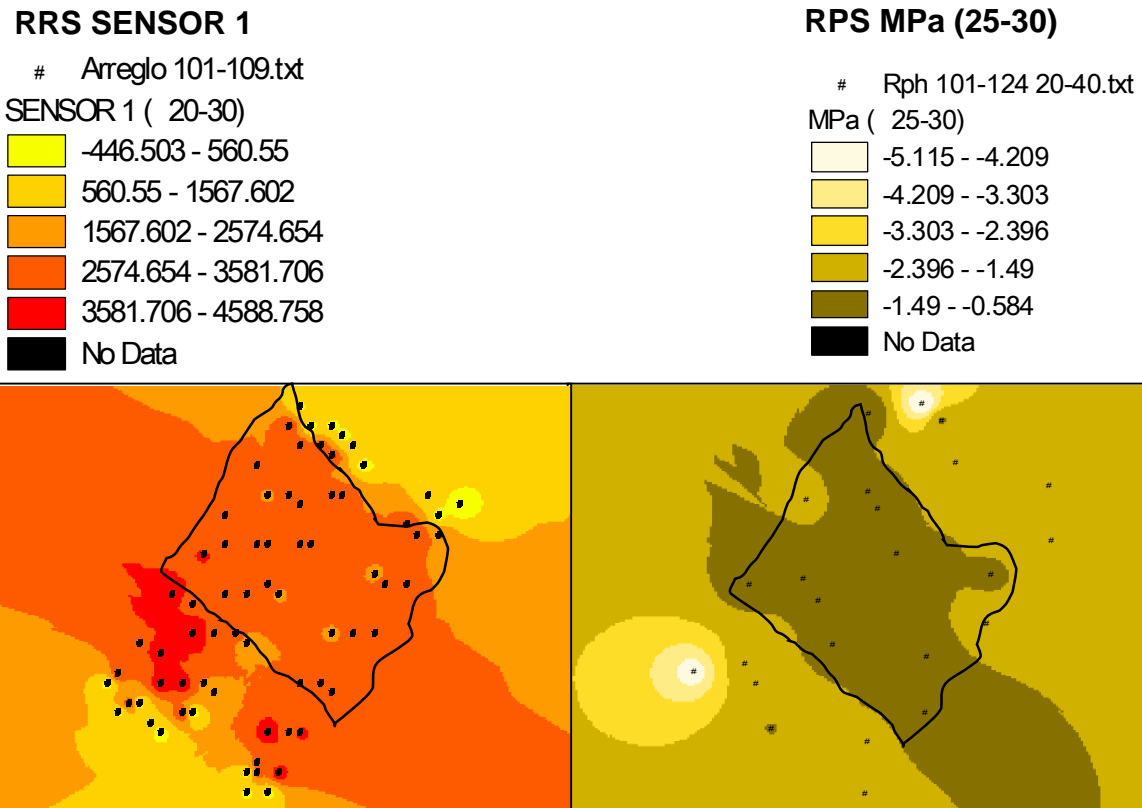


Figura 6.9 Resistencia a la roturación del suelo (sensor 1) y resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.25-0.30 m

6.2.9. Resistencia a la roturación del suelo (RRS) comparado con resistencia a la penetración del suelo (RPS) con H2 promedio 16.3%.

Respecto al análisis de estos dos sistemas que se mencionó anteriormente con diferentes rangos de profundidad para la RPS, ahora se observa un mapa con rango de profundidad 0.20-0.30 cm y equivalente a un fuerza sobre el área igual a 0.6-1.6 MPa igual a una fuerza de 2574.6-3581.1 N, comparando estos dos sistemas el área

es similar, pero también se puede mencionar que la RPS para la profundidad de 0.25-0.30 m y 0.20-0.30 m no existe mayor diferencia el área que se analiza. Figura (6.10).

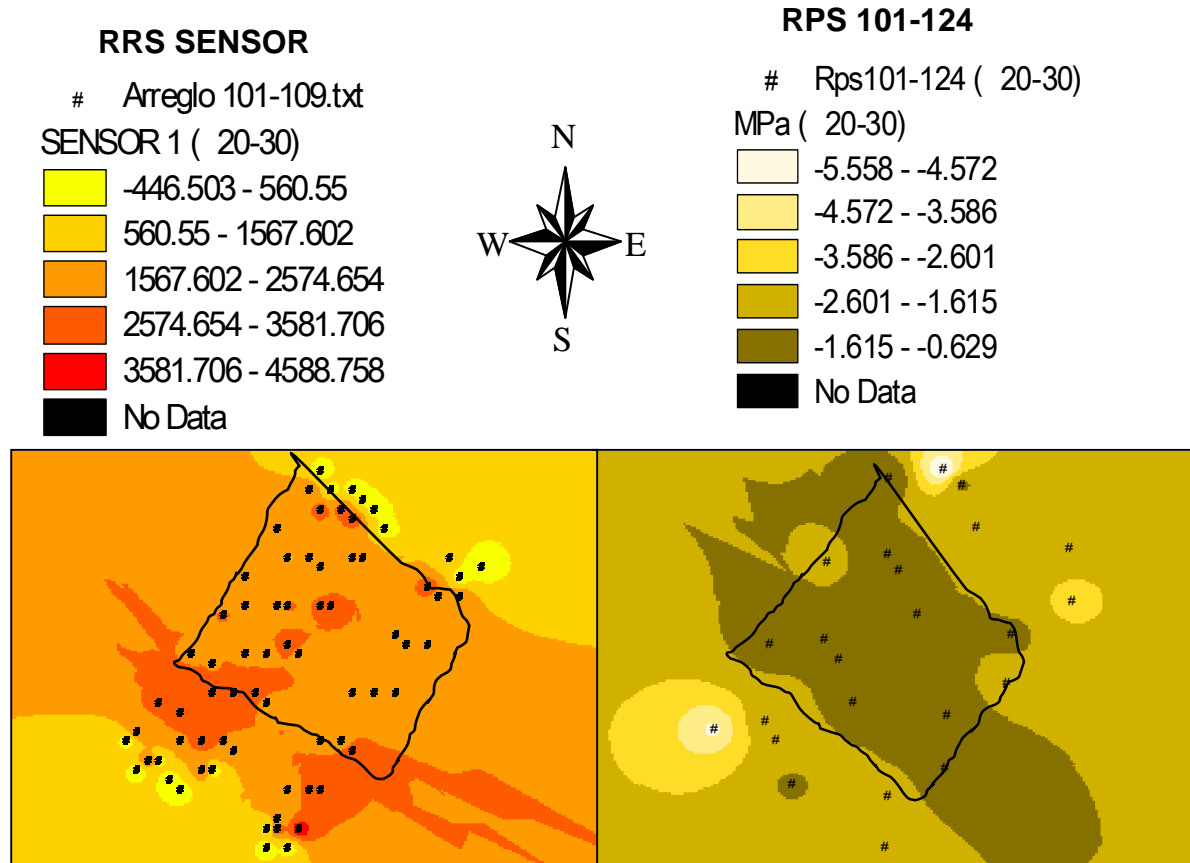
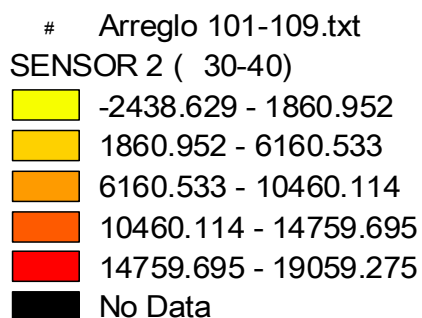


Figura 6.10 Resistencia a la roturación del suelo y Resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 20-30 cm

6.2.10. Resistencia a la roturación del suelo (RRS) comparado con resistencia a la penetración del suelo (RPS) con H2 promedio 16.3%.

En comparación de estos dos sistemas tanto para la Resistencia a la roturación del suelo con un rango de profundidad de 0.30-0.40 m (sensor 2) y la Resistencia a la penetración del suelo con rango de profundidad de 30-35 cm, en el mapa se observa que para la RPS equivalente a 1.1-2.2 MPa representa una fuerza equivalente a un rango de 6160.5-10460.1 N, el comportamiento de estos dos sistemas es similar el área tanto para la RRS como la RPS, la cual esta superficie se identifica con colores diferentes que a continuación se menciona, de color naranja claro y de color café respectivamente. Figura (6.11)

RRS SENSOR 2



RPS MPa (30-35)

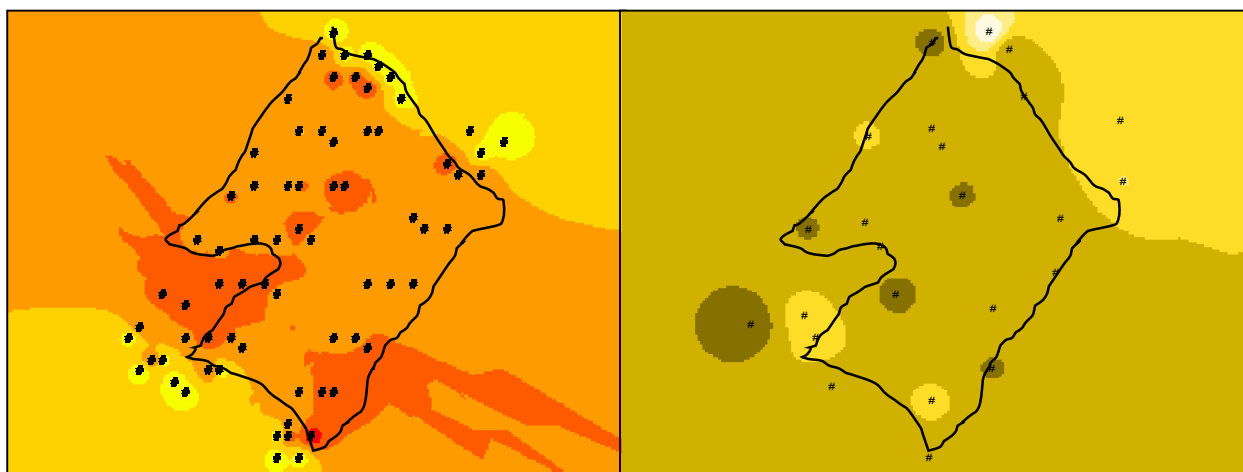
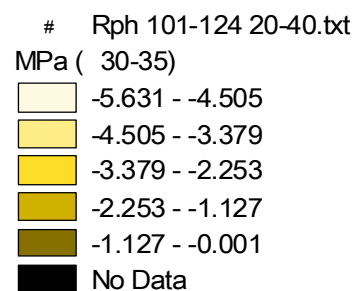
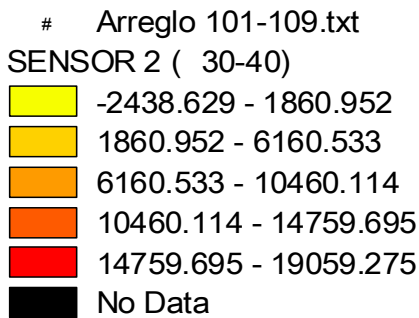


Figura 6.11 Resistencia a la roturación del suelo (sensor 1) y resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.30-0.35 m

6.2.11. Resistencia a la roturación del suelo (RRS) comparado con resistencia a la penetración del suelo (RPS) con H2 promedio del 16.3%.

En estos dos siguientes mapas la Resistencia a la penetración del suelo equivalente a una fuerza sobre el área igual a 1.1-2.3 MPa representa una fuerza 6160.5-10780.1 N, la cual indica que el área que domina para estos dos sistemas es similar y donde existe áreas menos compactadas, observando los dos mapas con colores diferentes, para la RRS domina el color naranja y el color café para la RPS, en este bloque se trabajó con porcentaje de humedad promedio del 16.3%. Figura (6.12).

RRS SENSOR 2



RPS MPa (35-40)

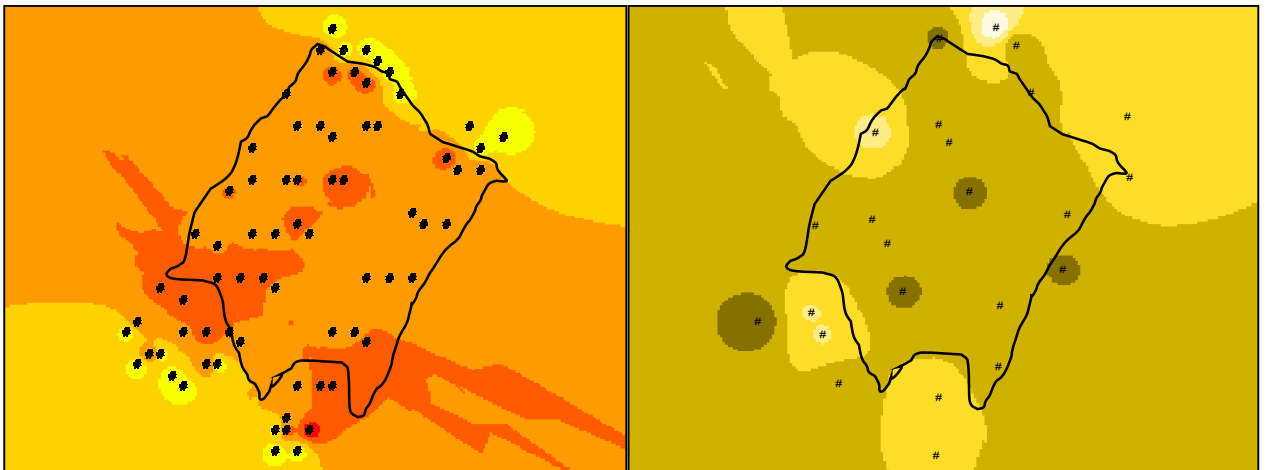
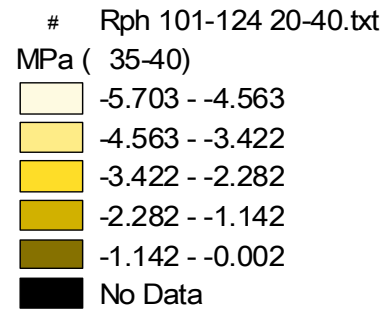


Figura 6.12 Resistencia a la roturación del suelo (sensor 2) y resistencia la penetración del suelo con profundidad de 0.35-0.40 m

6.2.12. Resistencia a la roturación del suelo (RRS) comparado con resistencia a la penetración del suelo (RPS) con H₂ promedio del 16.3%.

En comparación de estos dos sistemas trabajando con la misma profundidad igual 0.20-0.30 m, se observa el área que domina para estos dos sistemas tanto para la resistencia la penetración del suelo equivalente a 1-2.1 MPa corresponde a una fuerza igual a 6160.5-10460.1 N, es decir indica que es similar la superficie que se analiza. Figura (6.13).

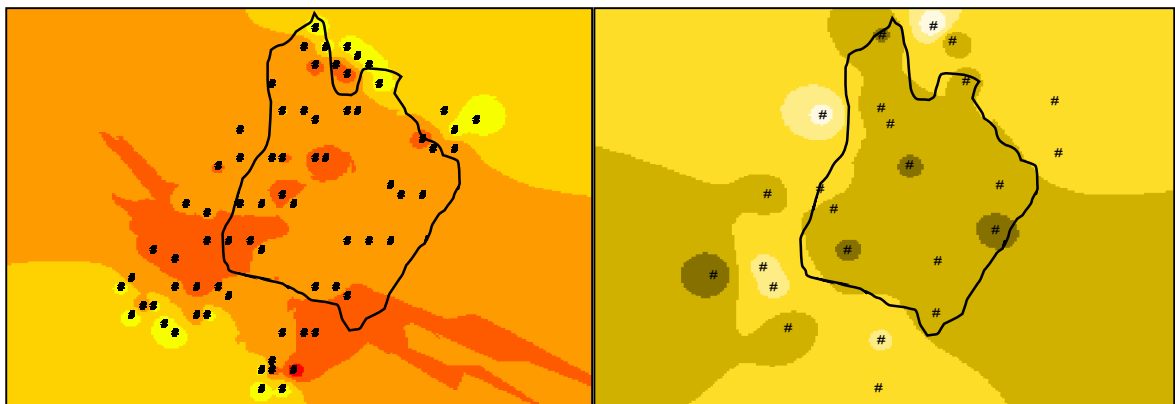
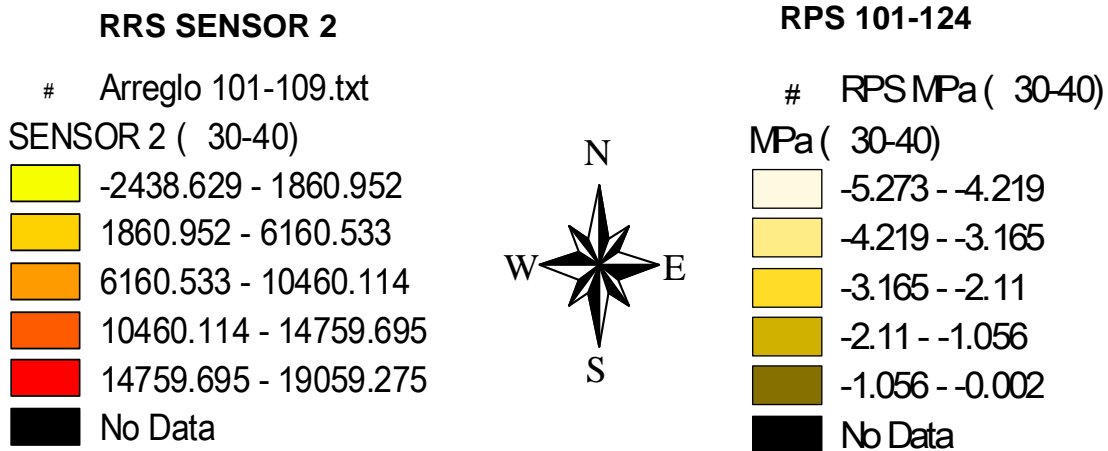
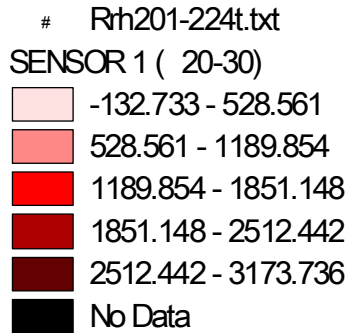


FIGURA 6.13 Resistencia a la roturación del suelo y Resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.30-0.40 m.

6.2.13. Resistencia a la roturación del suelo (RRS) vs resistencia a la penetración del suelo (RPS) con H3 promedio igual a 16.3%.

Haciendo la comparación de estos dos mapas, el comportamiento es similar tanto para la Resistencia a la penetración del suelo equivalente una fuerza sobre el área igual a 1.6-1.9 MPa como para la Resistencia a la roturación del suelo que representa un fuerza 1189.8-1851.1 N, la cual el área analizada es identifica con color rojo claro para la RRS y color verde limón para la RPS, se trabajó con un porcentaje de humedad promedio igual a 16.3%. (Figura 6.14).

RRS SENSOR



RPS MPa (20-25)

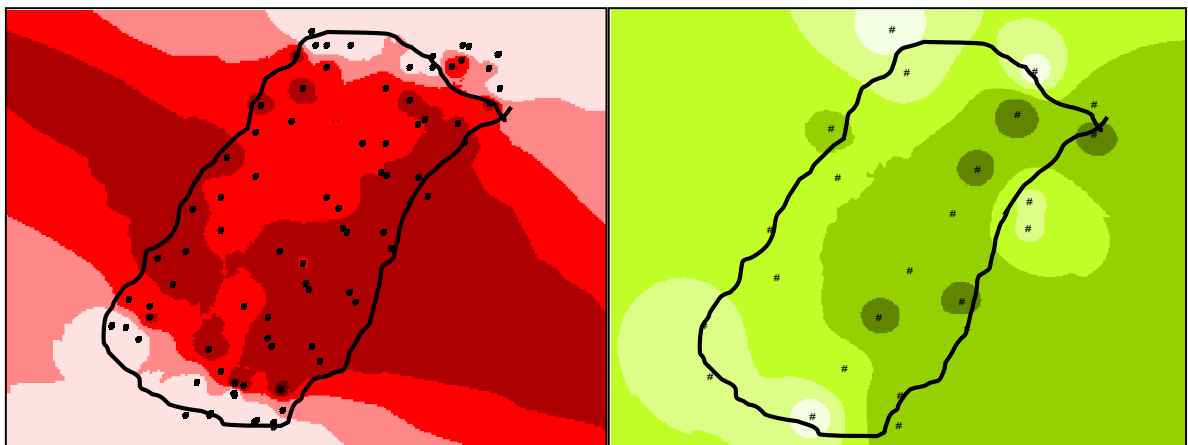
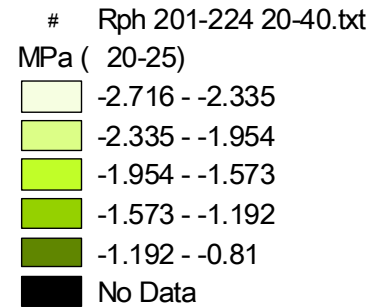
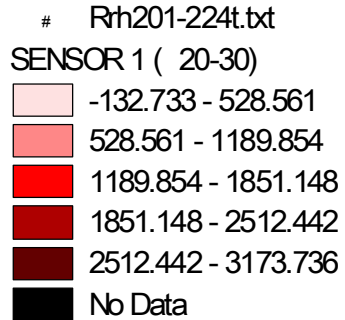


Figura 6.14 Resistencia a la roturación del suelo (sensor 1) y resistencia la penetración del suelo con profundidad de 0.20-0.25 m

6.2.14. Resistencia a la roturación del suelo (RRS) vs resistencia a la penetración del suelo (RPS) con H3 promedio del 16.3%.

En los dos mapas siguientes, la resistencia a la penetración del suelo es equivalente a un rango de fuerza sobre el área igual a 1.5-2-3 MPa que corresponde a una fuerza igual a 1851.1 N e incrementa a 2512 N, la cual se observa que si existe similitud en el bloque analizado, pero es poca la similitud. Para poder identificar esta área analizada se muestra con diferentes colores, tenemos un área sombreada con color rojo claro para la RRS y color verde limón para la RPS, trabajando con un porcentaje de humedad promedio del 16.3%. Figura (6.15).

RRS SENSOR 1



RPS MPa (25-30)

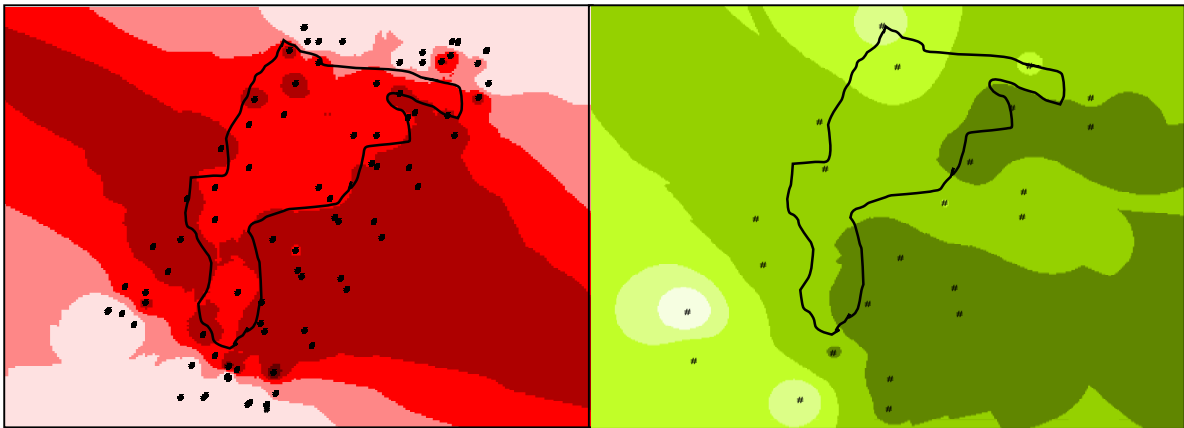
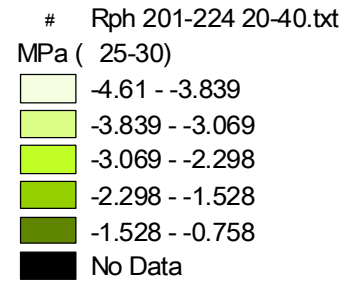


Figura 6.15 Resistencia a la roturación del suelo (sensor 1) y resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.25-0.30 m

6.2.15. Resistencia a la roturación del suelo (RRS) vs resistencia a la penetración del suelo (RPS) con H3 promedio del 16.3%.

En este siguiente mapa, se hace una comparación con el mapa anterior trabajando con la misma profundidad (0.20-0.30 m), el valor de la RPS es equivalente a 1.7-2.7 MPa que representa a una fuerza igual a 1189.8-1851.1 N, la cual nos indica que existen ciertas áreas similares para ambos sistemas. Figura (6.16).

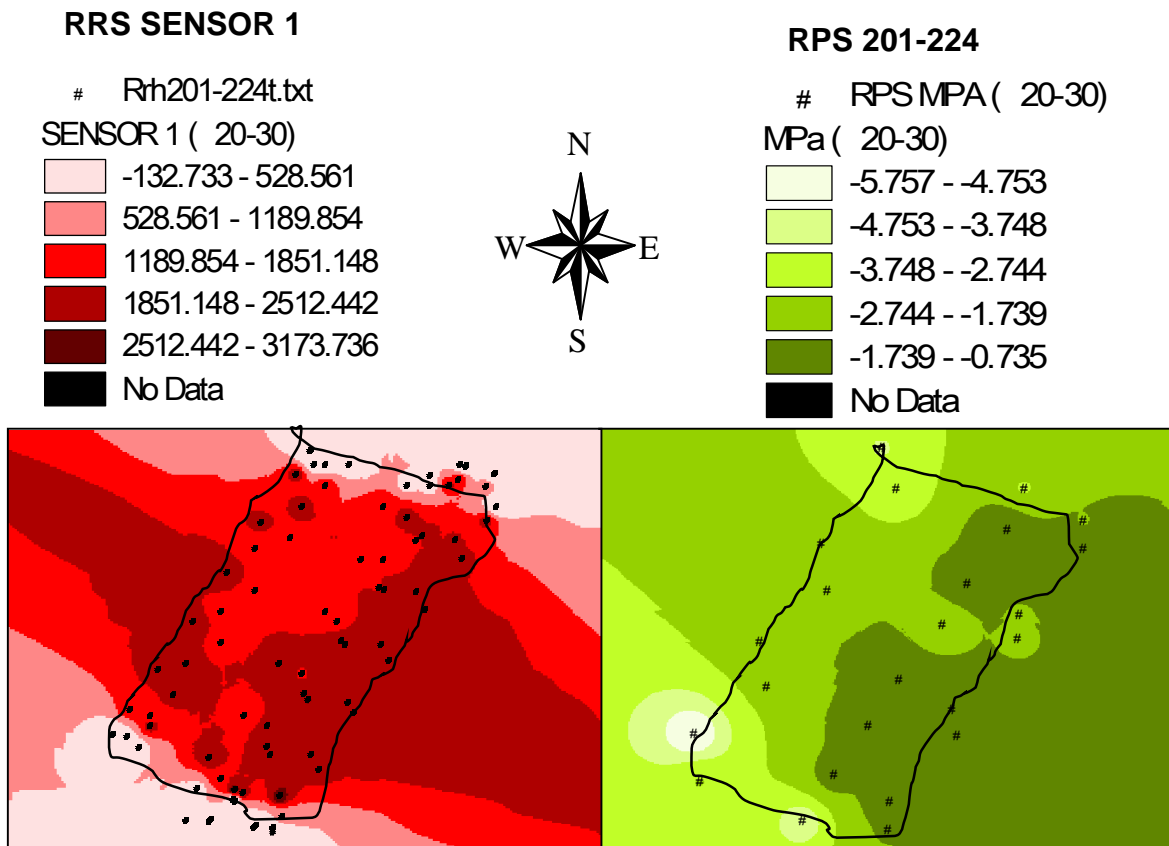
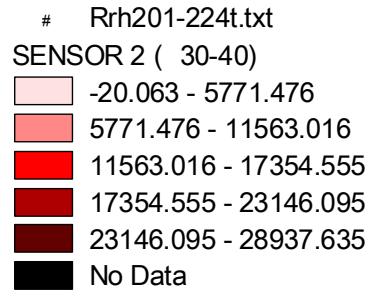


Figura 6.16 Resistencia a la roturación del suelo y Resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.20-0.30 m

6.2.16. Resistencia a la roturación del suelo (RRS) comparado con resistencia a la penetración del suelo (RPS) con H3 promedio del 16.4%.

De acuerdo a estos dos mapas, el espacio que se analiza para la Resistencia a la penetración del suelo la fuerza que ejerce sobre el área es igual a un rango de 1.7-2.7 MPa que corresponde a una fuerza equivalente a 5771.7-11563 N, donde hay otros espacios con diferente valor de fuerza sobre el área, de este modo el espacio se identifica con color rosa para la RRS y con color verde limón para la RPS, trabajando con un porcentaje de humedad promedio igual a 16.4%. Figura (6.17).

RRS SENSOR 2



RPS MPa (30-35)

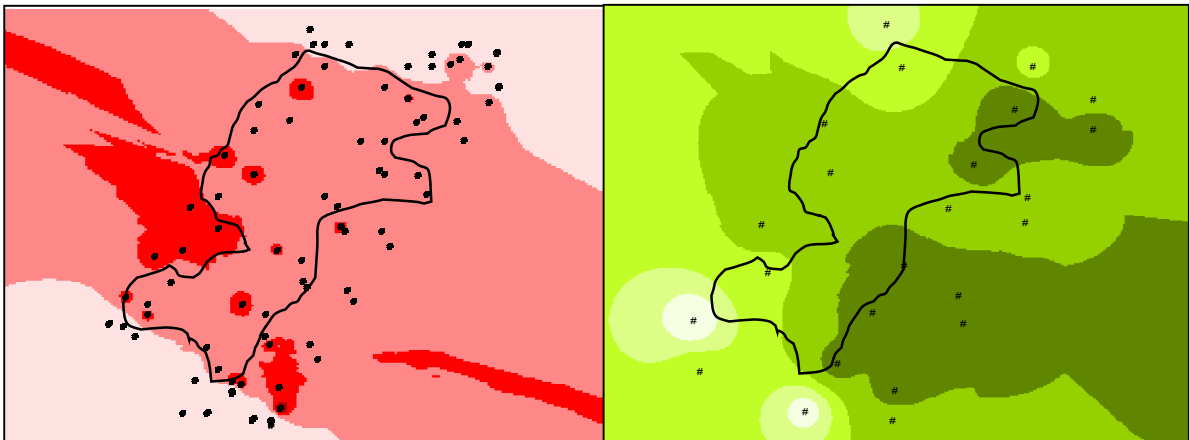
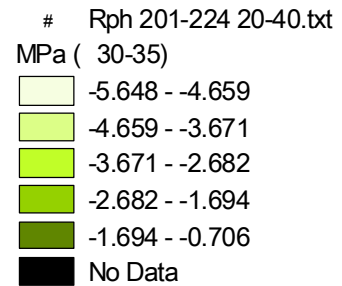


Figura 6.17 Resistencia a la roturación del suelo (sensor 2) y resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.30-0.35 m

6.2.17. Resistencia a la roturación del suelo (RRS) comparado con resistencia a la penetración del suelo (RPS) con H3 promedio del 16.4%.

Para los dos siguientes mapas, la resistencia a la penetración del suelo existe un rango de fuerza sobre el área equivalente a 1.7-2.6 MPa donde corresponde a una fuerza igual a 5771.4-11563 N, donde el área es similar pero en la superficie que está sombreada, identificando de la siguiente manera con color rosa para la RRS y color verde limón y verde claro para la RPS, trabajando con humedad promedio de 16.4%. Figura (6.18)

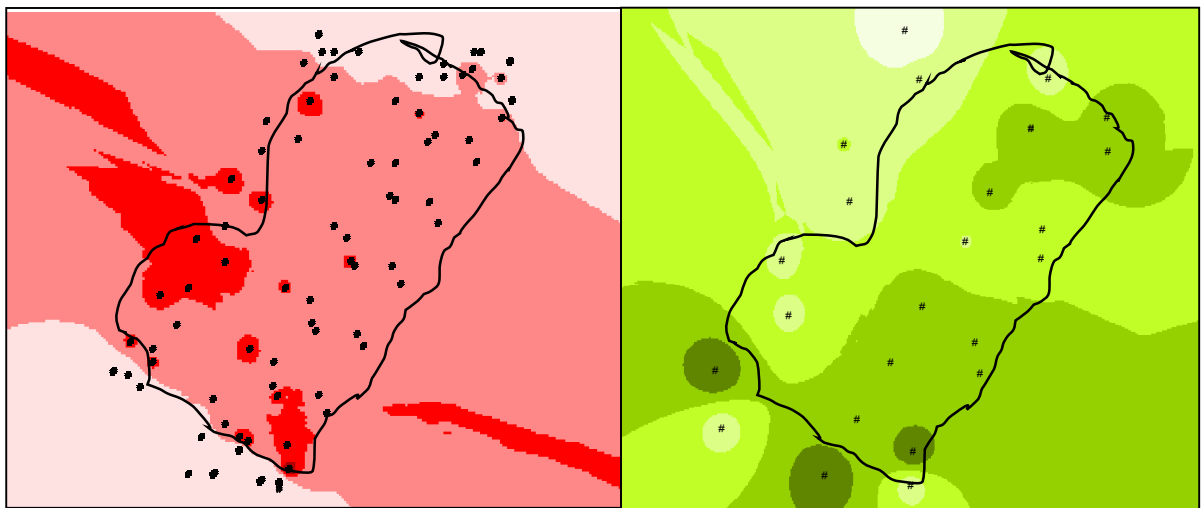
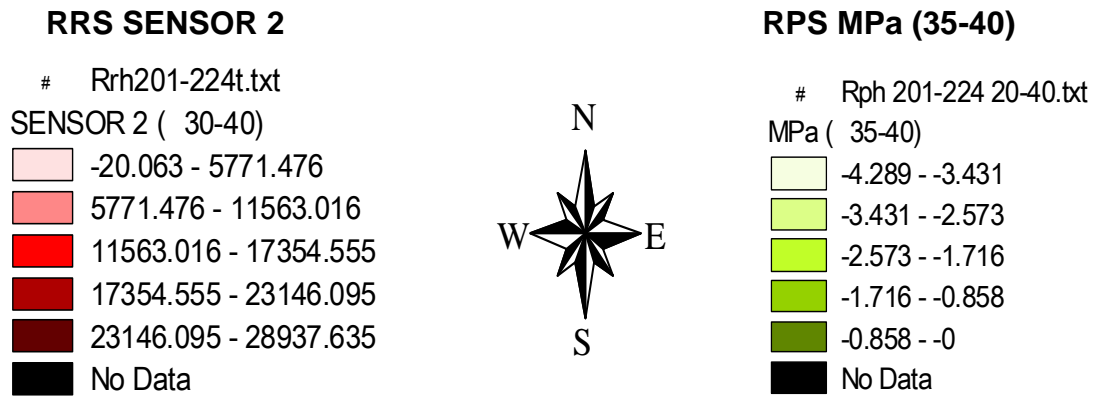


Figura 6.18 Resistencia a la roturación del suelo (sensor 1) y resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.35-0.40 m

6.2.18. Resistencia a la roturación del suelo (RRS) comparado con resistencia a la penetración del suelo (RPS) con H3 promedio del 16.4%.

Interpretando este último mapa comparado con el anterior (RRS), se observa el comportamiento de estos dos sistemas, para la Resistencia a la penetración del suelo equivalente a un rango de fuerza que ejerce sobre el área es igual a 1.7-2.6 MPa que corresponde a un fuerza equivalente a 5771.1-11563 N, la cual es similar para ambos casos. Figura (6.18).

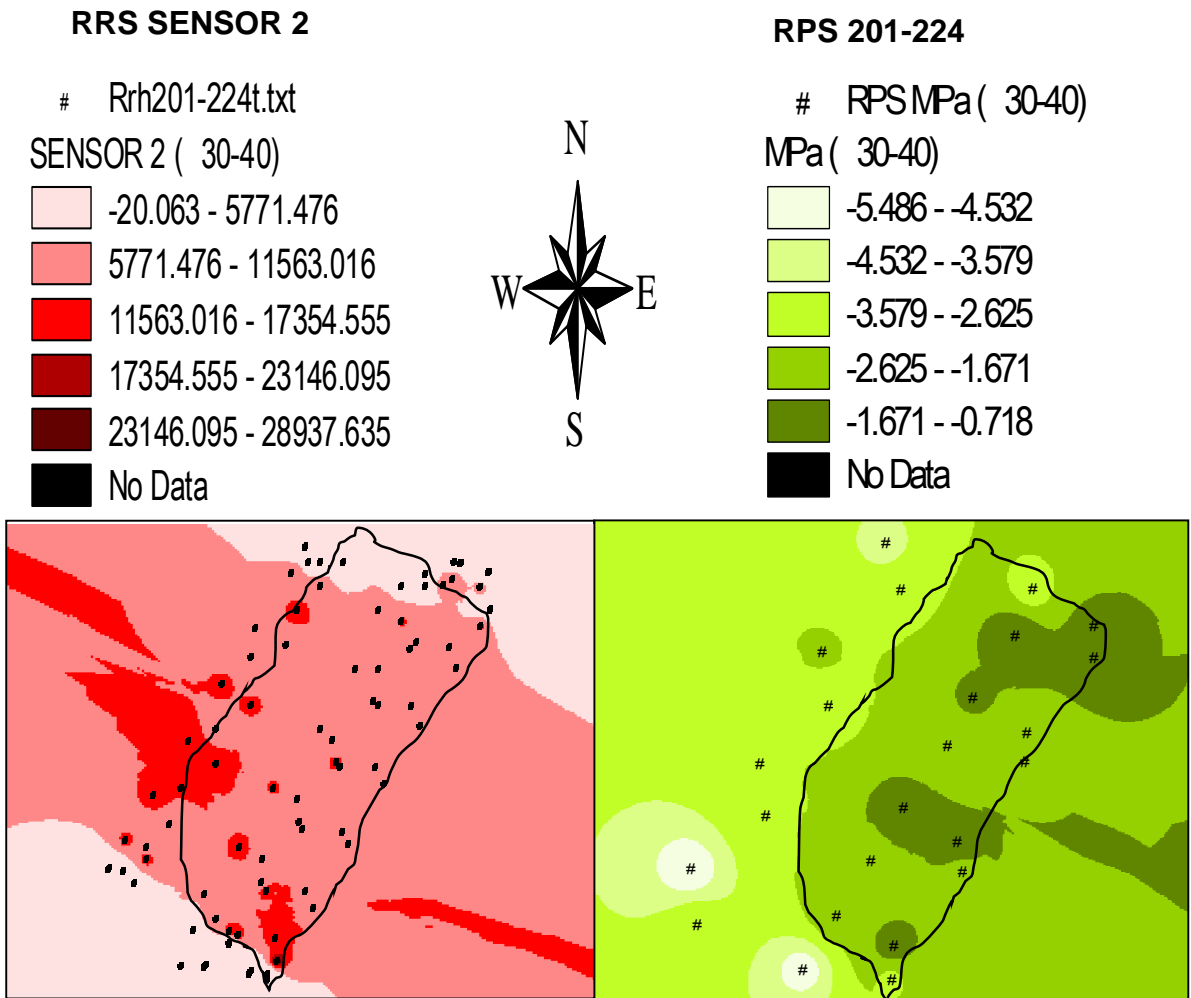


Figura 6.19 Resistencia a la roturación del suelo y resistencia a la penetración del suelo con profundidad de 0.30-0.40 m

6.2.19. Referencia de los datos de Resistencia a la penetración y de Resistencia a la roturación

El cuadro 6.1. Contiene los datos de la RPS con profundidad de rango de 0.20-0.40 m en escalas de 5 a 5 y la RRS con escalas de 10 a 10, las medias de los promedios tanto para la RPS como la RRS y la proporcionalidad de ellos entre $N \text{ MPa}^{-1}$ cuyos valores son de todos los mapas que se analizaron.

Cuadro 6.2 Referencia de valores de Resistencia a la penetración y Resistencia a la roturación del suelo con diferentes profundidades y humedades.

Profundidad m	Humedad %	RR (N)		RP (MPa)		Proporcionalidad N MPa ⁻¹
		Rango	Promedio	Rango	Promedio	
0.20-0.25	11.4	2030.2-3980.9	3005.6	2.9-4.3	3.6	834.89
0.20-0.25	16.3	1567.6-2574.6	2071.1	1.2-2.0	1.6	1294.44
0.20-0.25	16.4	1189.8-1851.1	1520.5	1.6-1.9	1.8	844.72
0.25-0.30	11.4	2030.2-3980.9	3005.6	2.4-3.5	3.0	1001.87
0.25-0.30	16.3	2574.6-3581.7	3078.2	0.6-1.5	1.0	3078.20
0.25-0.30	16.4	1189.8-1851.1	1520.5	1.5-2.3	2.0	760.25
0.20-0.30	11.4	2030.2-3980.9	3005.6	3.0-3.9	3.4	884.00
0.20-0.30	16.3	1567.6-2574.6	2071.1	0.6-1.6	1.1	1882.82
0.20-0.30	16.4	1189.8-1851.1	1520.5	1.7-2.7	2.2	691.14
0.30-0.35	11.7	9475.6-15611.1	12543.3	2.2-3.3	2.8	4479.75
0.30-0.35	16.3	6160.5-10460.1	8310.3	1.1-2.2	1.7	4888.41
0.30-0.35	16.4	5771.5-11563.0	8667.2	1.7-2.7	2.2	3939.64
0.35-0.40	11.7	9475.6-15611.1	12543.3	3.0-4.0	3.5	3583.80
0.35-0.40	16.3	6160.5-10460.1	8310.3	1.1-2.3	1.7	4888.41
0.35-0.40	16.4	5771.5-11563.0	8667.2	1.7-2.6	2.1	4127.24
0.30-0.40	11.7	9475.6-15611.1	12543.3	3.4-4.0	3.7	3390.08
0.30-0.40	16.3	6160.5-10460.1	8310.3	1.0-2.1	1.6	5193.94
0.30-0.40	16.4	5771.5-11563.0	8667.2	1.7-2.6	2.1	4127.24
Promedio			6075.62		2.28	2771.71

Con una desviación estándar de 1705.14 N MPa⁻¹

VII. CONCLUSIONES Y RECOMEDACIONES

7.1. Conclusiones

Se obtuvieron los mapas de diagnóstico de resistencias de roturación como resistencia a la penetración de suelo.

Se encontró una correlación entre la resistencia de roturación con la resistencia a la penetración de 2771.7 N por MPa con una desviación estándar de 1705.1 N MPa⁻¹.

7.2. Recomendaciones

Incrementar el número de muestreos en otros sitios con un amplio rango de cohesión del suelo, con la finalidad de determinar una ecuación de correlación entre el esfuerzo a la roturación vs esfuerzo a la penetración con una menor desviación estándar.

VIII. LITERATURA CITADA

- Albarenque, S.M.** 2011. Técnicas para procesamiento de mapas de rendimiento. Red agricultura de precisión. 1° edición. Pp (2-3).
- ASAE Standards**, 49th Ed. 2002. EP542. Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Bengough, A. G., D. J. Campell, M. F., And O'Sullivan.** 2001. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. pp. 377-403. In: K. A. Smith and C. E. Mullins (eds.). Soil and environmental analysis. Marcel Dekker. New York, NY, USA.
- Boon, N. E., A. Yahya, And A. F. Kheiralla, B. S. Wee, And S. K. Gew.** 2005. A tractor-mounted, automated soil penetrometer shear meter unit for mapping soil mechanical properties. Biosyst. Engin. 90: 1-96
- Bragachini, M.** 2004. Agricultura de Precisión y Siembra Variable de insumos en tiempo real mediante el uso de GPS y una prescripción con sembradora IOM Inteligente Mega de 12 surcos a 52,5 cm. Pp 1.
- Cabrera, M. S., Panequ, R. P., Pérez, O. C., Plá, R. E.** 2008. Métodos de estudio del estado físico de los suelos. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, vol. 17. Universidad Agraria de La Habana, Cuba.
- Corwin, D.L., and J.D Rhoades.** 1981. Determining soil electrical conductivity using an inductive electromagnetic soil conductivity meter; Soil Sci. Soc. Amer. J 45255260
- FAO.** 2009. Guía para la descripción del suelo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.
- François, J. M., Velázquez A., Couturier S.** 2008. La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. UNAM. Morelia, Michoacán, México. 117 p.
- García, F. O.** 2002. Beneficios potenciales del uso de las herramientas de la agricultura de precisión en el diagnóstico y aplicación de fertilizantes. Taller internacional de agricultura de precisión del cono sur de américa. Córdoba, Argentina.

- Gallegos, R. J. M.** (2004). Diseño y Evaluación de un Software Para Micro controladores PIC, para la digitalización de la señal de un Penetrómetro.
- González, C. O., Iglesias C. C. E., Herrera S. M.** 2009. Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, vol. 18, P 2. Universidad Agraria de La Habana Cuba.
- Hinojosa, M.** (2003), Desarrollo de un transductor de fuerzas para la evaluación de implementos integrales en tractores categoría II Basado en el diseño Octagonal extendido. Tesis de licenciatura sin publicar. Departamento de maquinaria agrícola. UAAAN. Buenavista, Saltillo; Coahuila, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).** 2004. Especificaciones para la extracción de datos geográficos digitales. Dirección General de Geografía. Aguascalientes, México. Pp7-80.
- Jiménez, M. M.** 2011. Equipo para la generación de mapas de resistencia a la penetración y esfuerzo a la falla del suelo. Tesis de Licenciatura. UAAAN. Saltillo, Coahuila, México. 82 p.
- López, J. A.** 2012. Evaluación de un sensor de permisividad eléctrica para agricultura de precisión. Tesis de Licenciatura. UAAAN. Saltillo, Coahuila, México. 89 p.
- Marntini, A., Branchini, A., Bragachini, M.** 1999. Sistema de posicionamiento. Agricultura de Precisión, 1° ed. P 1.
- Marín, O. L.** (2003). Desarrollo de un Transductor de fuerzas para la evaluación de implementos integrales a tractores categoría II. "Basado en el diseño de vigas sometidas a esfuerzos flexionantes y Torsionantes". Tesis de 57 licenciatura sin publicar. Departamento de maquinaria agrícola. UAAAN Buena vista, Saltillo; Coahuila, México.
- Norton G. W and S.M Swinton.**2001. Precisión agriculture: Global prospects and environmental implications. Forthcoming in G.H Peters and P. Pingali, eds. Tomorrow's Agriculture: Incentives, institutions, infrastructure and innovations: proceeding of the 24th international conference of agricultural Economits, 200. Lond: Ashgate
- Padrón, P. J.** 2005. Penetrómetro hidráulico para medir la resistencia a la penetración del suelo, 1ra parte. Cuba.

- Pagnano, G.** Magalhaes. 2010. Facultad de Ingeniería Agrícola – Unicamp – Campinas – SP – Brasil. Sistema de Monitoreo de la Cosecha de Caña de Azúcar para Elaborar Mapas de Rendimiento.
- Paredes, M. R.,** Mandujano B A., Gámez V. J. A., García N. H. 2011. Actualización del mapa de uso del suelo agrícola en el estado de Guanajuato. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias México. Vol. 2, N° 1, Pp 85-96
- 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.
- Reynolds, C.** 2012. Uso de labranza vertical y agricultura de precisión para la optimización de energía en labranza primaria del suelo. Tesis Doctorado. UAAN. Saltillo, Coahuila, México. Resumen.
- 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.
- Tormena, C.A;** Da silva, AP; Libardi, PL. 1999. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. Soil & Tillage Research 52:223-232

Páginas Web consultadas

- García, E. y Flego F.** Agricultura de Precisión. Revista Ciencia y Tecnología Agropecuaria. [En línea] [Fecha de consulta: 15 de Abril 2017]. <http://www.palermo.edu/ingenieria/downloads/pdfwebc&T8/8CyT12.pdf>
- Martini, A.,** Branchini, A y Bragachini, M 2010. Sistema de posicionamiento. INTA Manfredi <http://www.agriculturadeprecision.org/articulos/sistema-gps/Sistemas-Posicionamiento.asp>. (30, mayo, 2017).
- Pagnano, N y Magalhaes, S.** 1999. Sistema de monitoreo de la cosecha de caña de azúcar para elaborar mapas de rendimiento. Facultad de ingeniería agriclola. UnicampINTA Manfredi <http://www.agriculturadeprecision.org/articulos/monitores-rendimiento/Sistema->

[Monitoreo-Cana-Azucar-Para-Elaborar-Mapas-Rendimiento.asp](#). (31, mayo, 2017).

Red Agricultura de Precisión. Título.
<http://www.agriculturadeprecision.org/index.asp?tit=Novedades> (Fecha de consulta)

Anónimo. Manejo del suelo.
<http://www.uclm.es/profesorado/porrasysoriano/tfcaps1/pdf/TEMA3.pdf> (fecha)

Robótica, 2010. Sensores para medir distancia. [En línea] [Fecha de consulta: 10 de abril 2014].
<<http://robotica2010.wikispaces.com/4+Sensores+para+medir+distancia>>

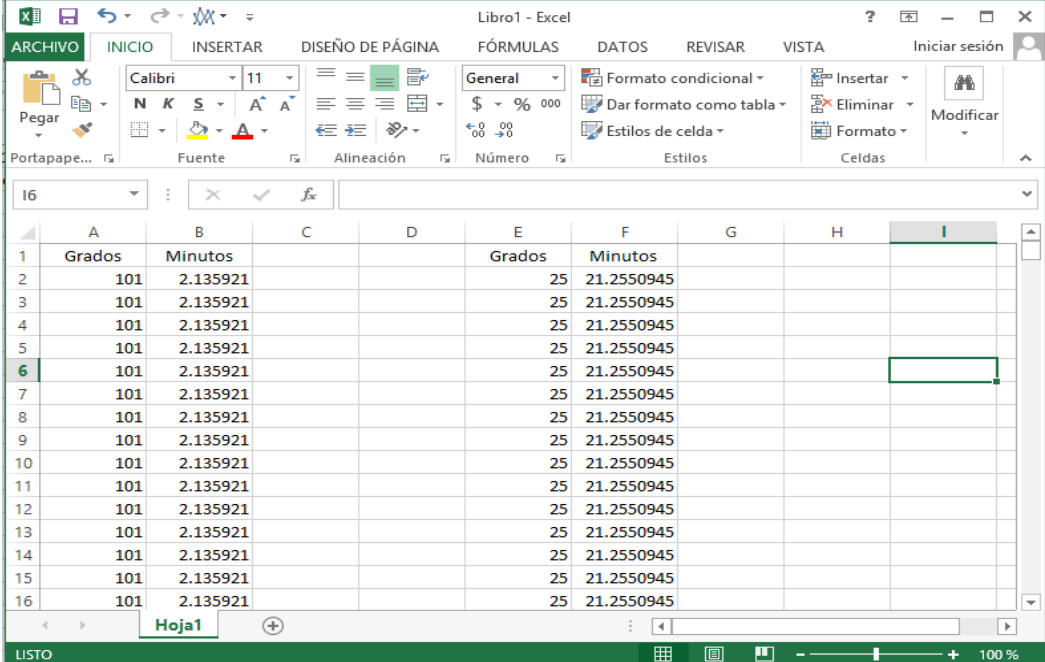
IX. ANEXOS

Anexo 1

9.1. Pasos para la generación de los mapas en ArcView 3.2

Proceso para la generación de mapas en el software ArcView 3.2 para resistencia a la penetración de suelo (MPa).en diferentes humedades y profundidades.

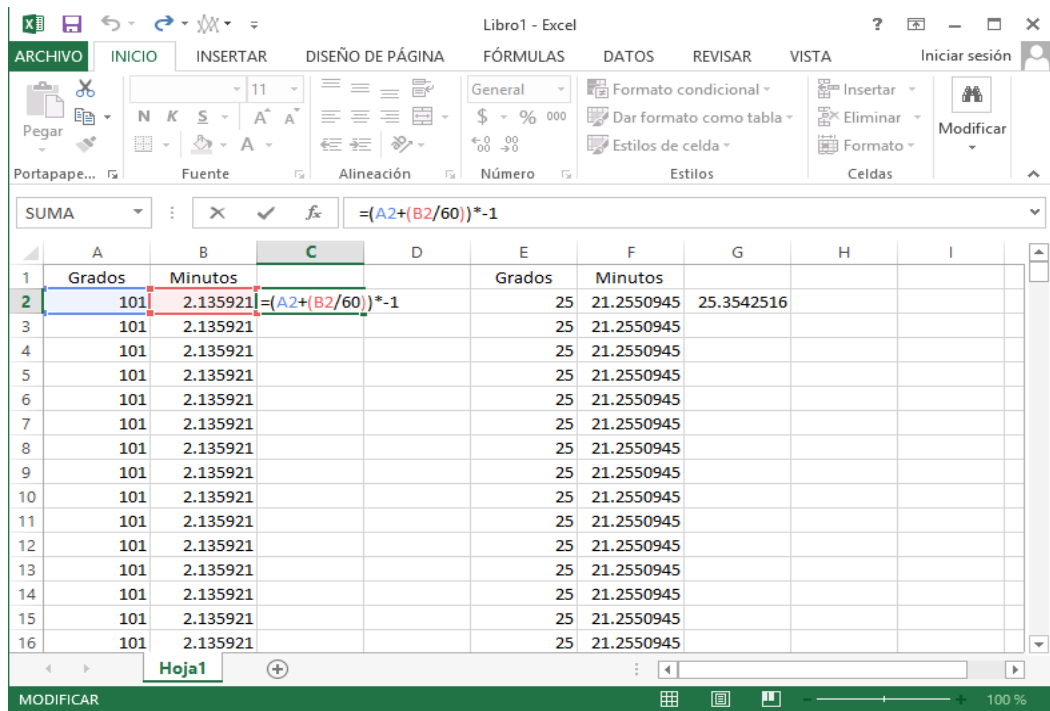
1. Teniendo los datos obtenidos en campo con el geoposicionador Ag GPS 132 Trimble. Se abre un nuevo documento Excel, para ordenar y convertir las coordenadas a grados decimales.



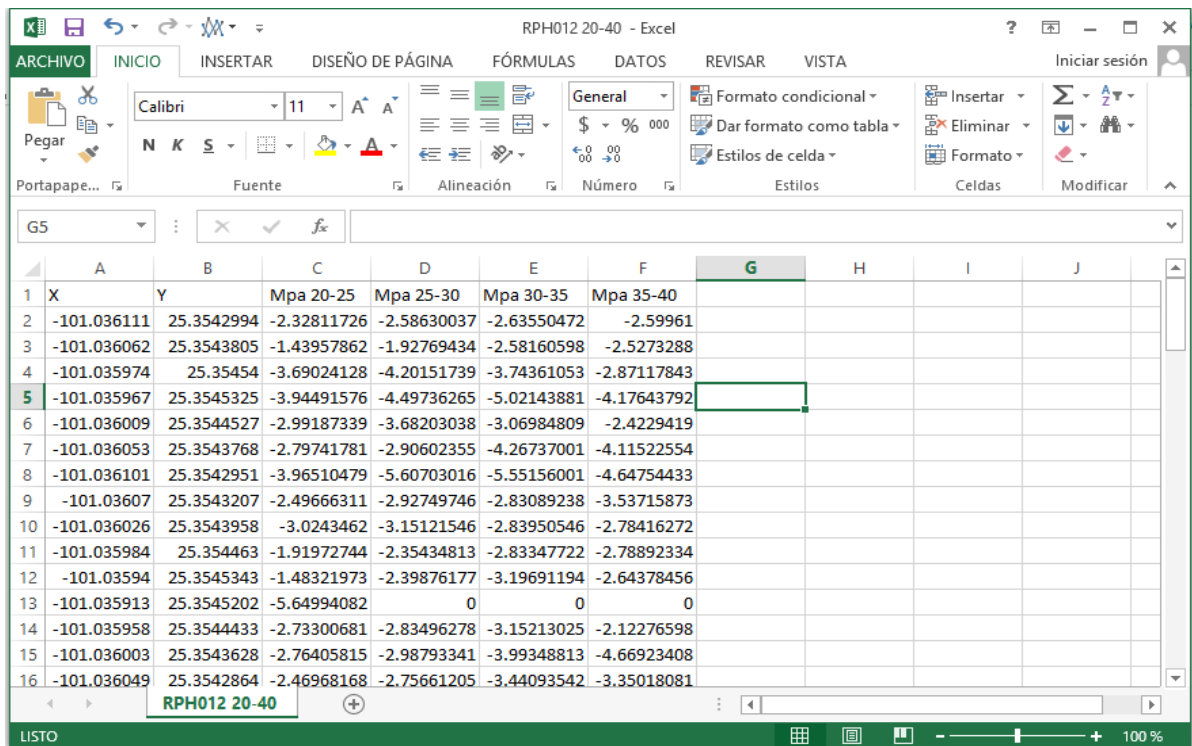
The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet with the following data:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Grados	Minutos			Grados	Minutos			
2	101	2.135921			25	21.2550945			
3	101	2.135921			25	21.2550945			
4	101	2.135921			25	21.2550945			
5	101	2.135921			25	21.2550945			
6	101	2.135921			25	21.2550945			
7	101	2.135921			25	21.2550945			
8	101	2.135921			25	21.2550945			
9	101	2.135921			25	21.2550945			
10	101	2.135921			25	21.2550945			
11	101	2.135921			25	21.2550945			
12	101	2.135921			25	21.2550945			
13	101	2.135921			25	21.2550945			
14	101	2.135921			25	21.2550945			
15	101	2.135921			25	21.2550945			
16	101	2.135921			25	21.2550945			

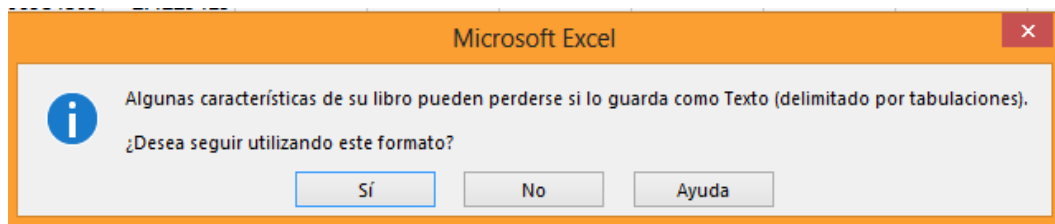
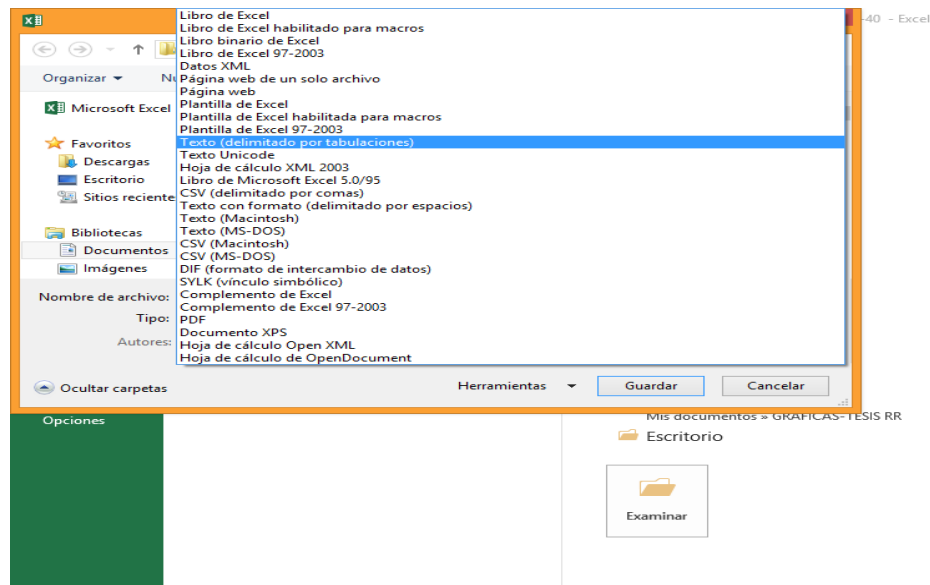
2. En una nueva columna se escribe la fórmula “= (grados + (minutos/60) para la latitud, en caso de la longitud se le multiplica con -1 por situación geográfica.



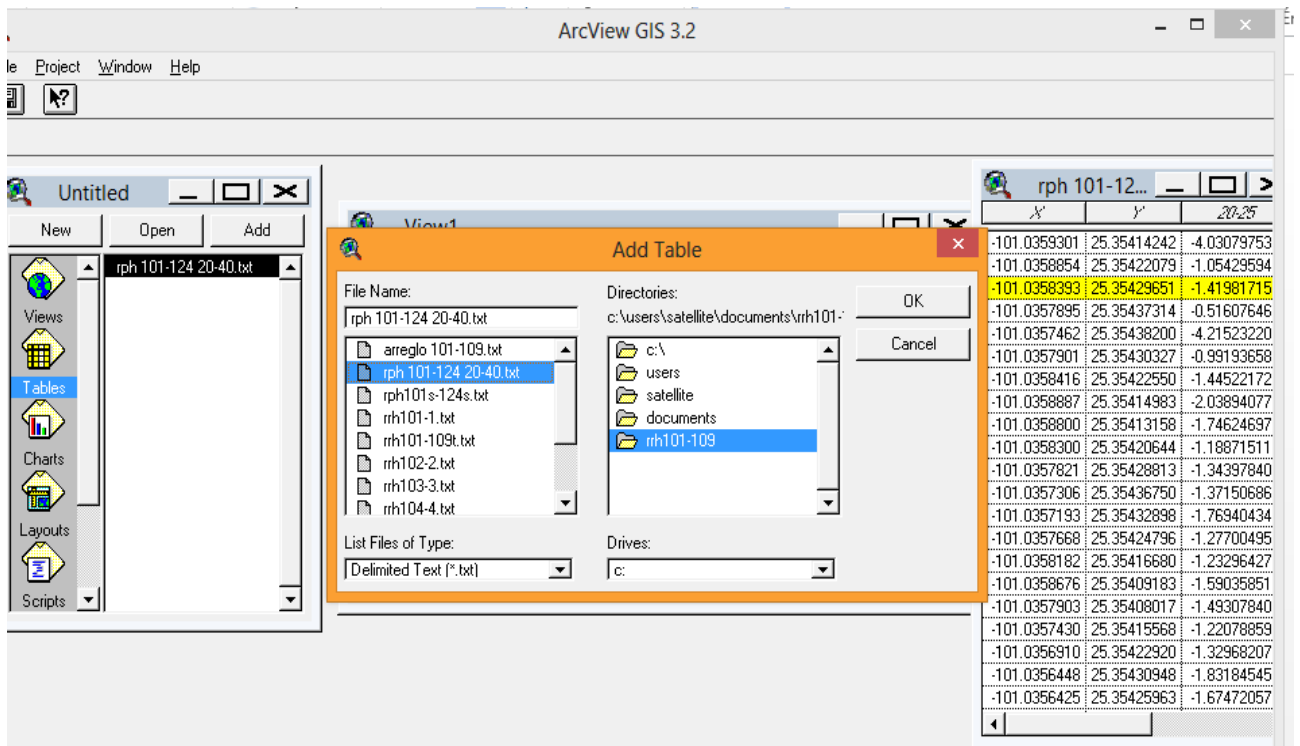
- En una hoja nueva de Excel, se copiando los datos que fueron convertidos en decimales y se agrega el dato de MPa con diferentes rango de profundidades.



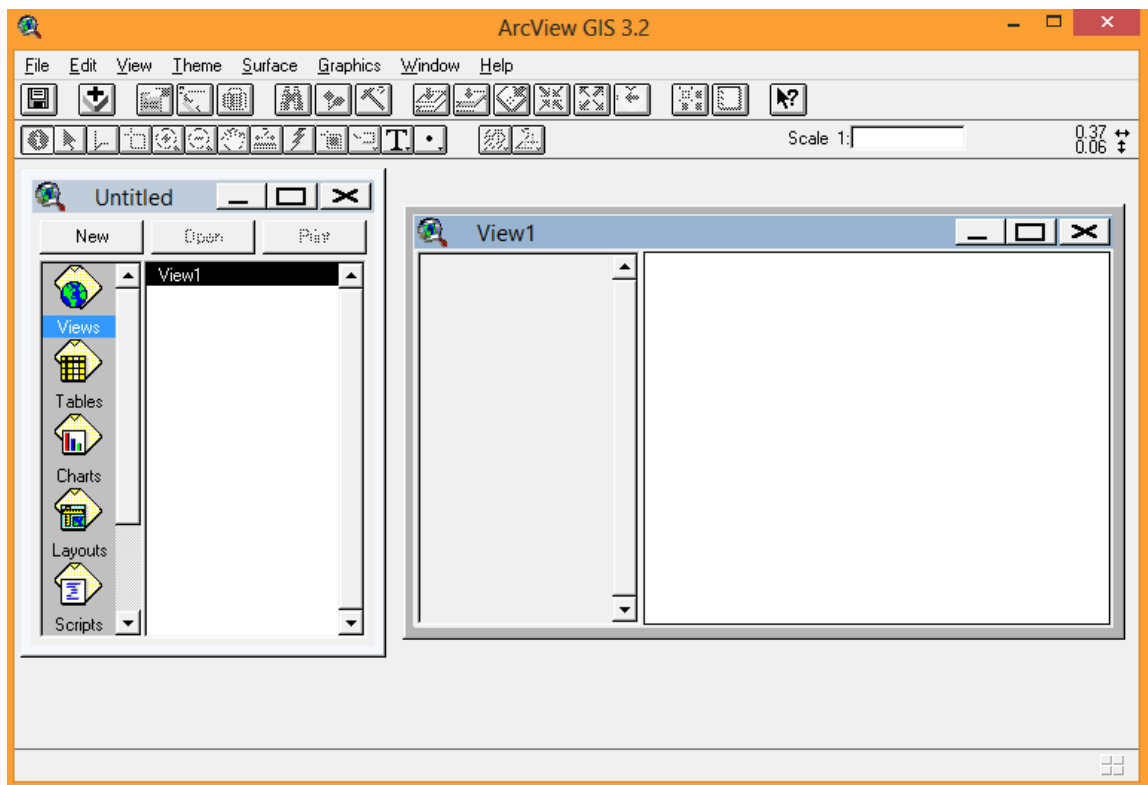
4. En el siguiente paso, la información se guarda como (delimitado por tabulación) TxT, le damos guardar, en la próximas ventanas que nos aparece darle clic en aceptar y así respectivamente.



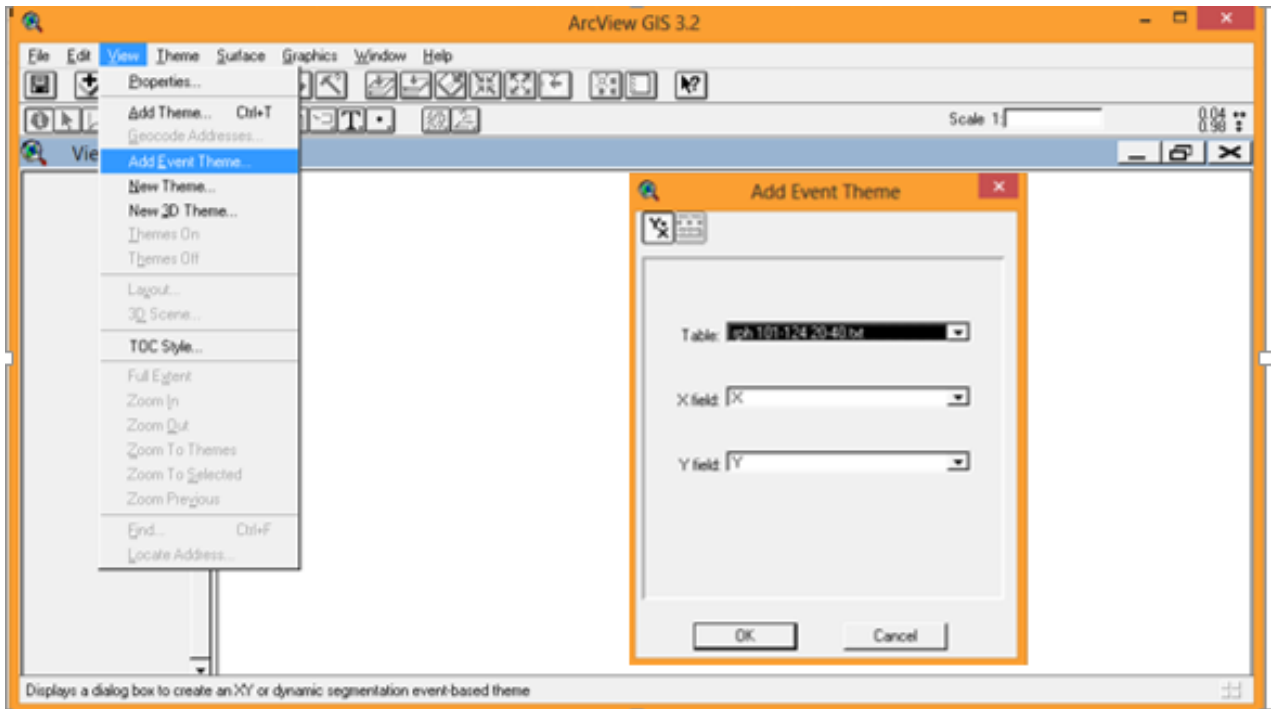
5. Después de guardar todo la información, se abre el software ArcView 3.2 , ubicamos una ventana de varios comandos, seleccionamos TABLE + Add, se abre una ventana de archivos, se busca el archivo txt, dar clic en OK y aparece la tabla de datos.



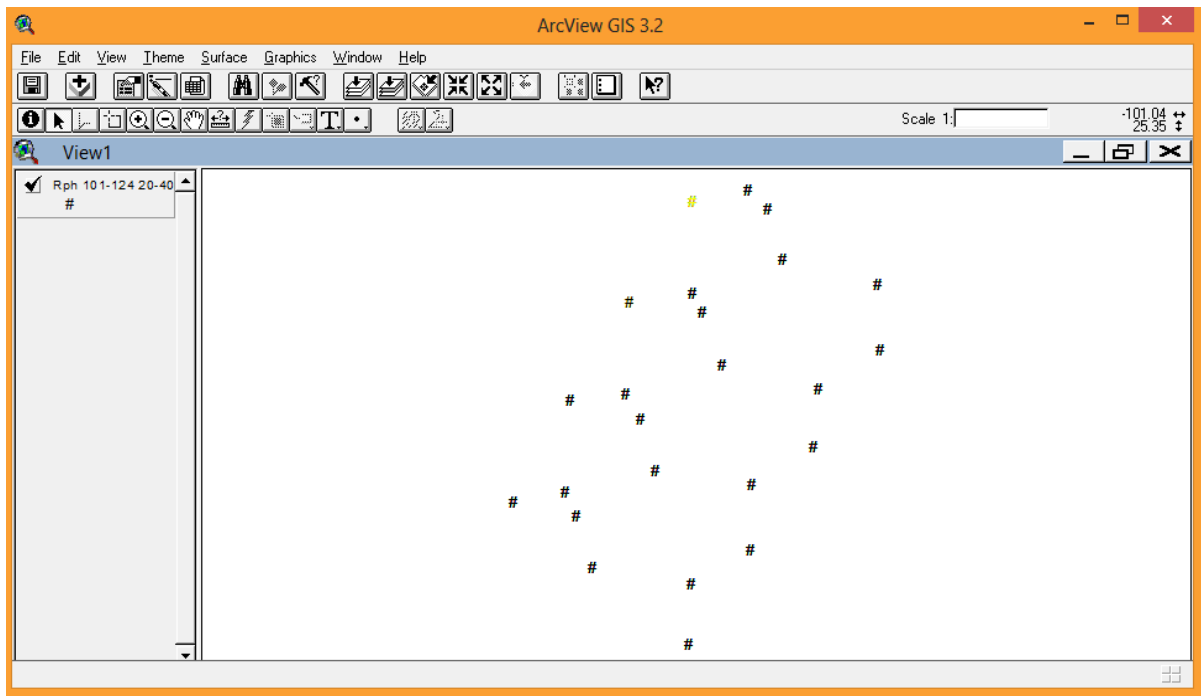
6. Seleccionamos Views + New y se abre la ventana de trabajo.



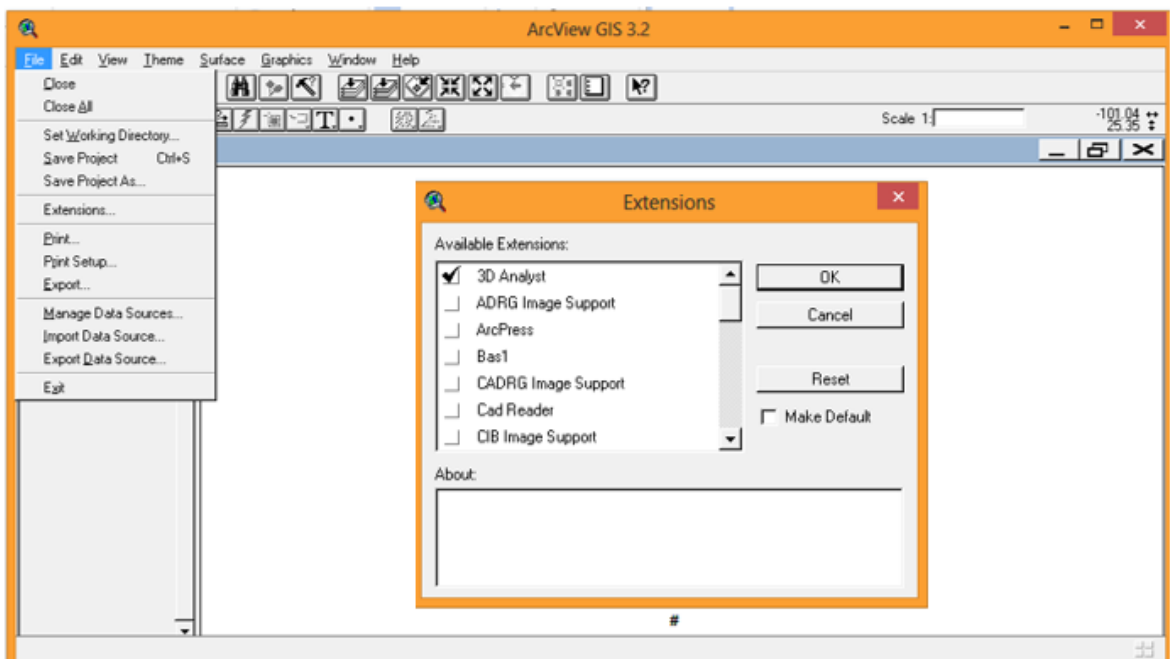
7. Ubicar View + Add Event Theme nos muestra una ventana, pide el nombre de la tabla, X y Yes por defecto nos proporciona el software le damos clic en OK.



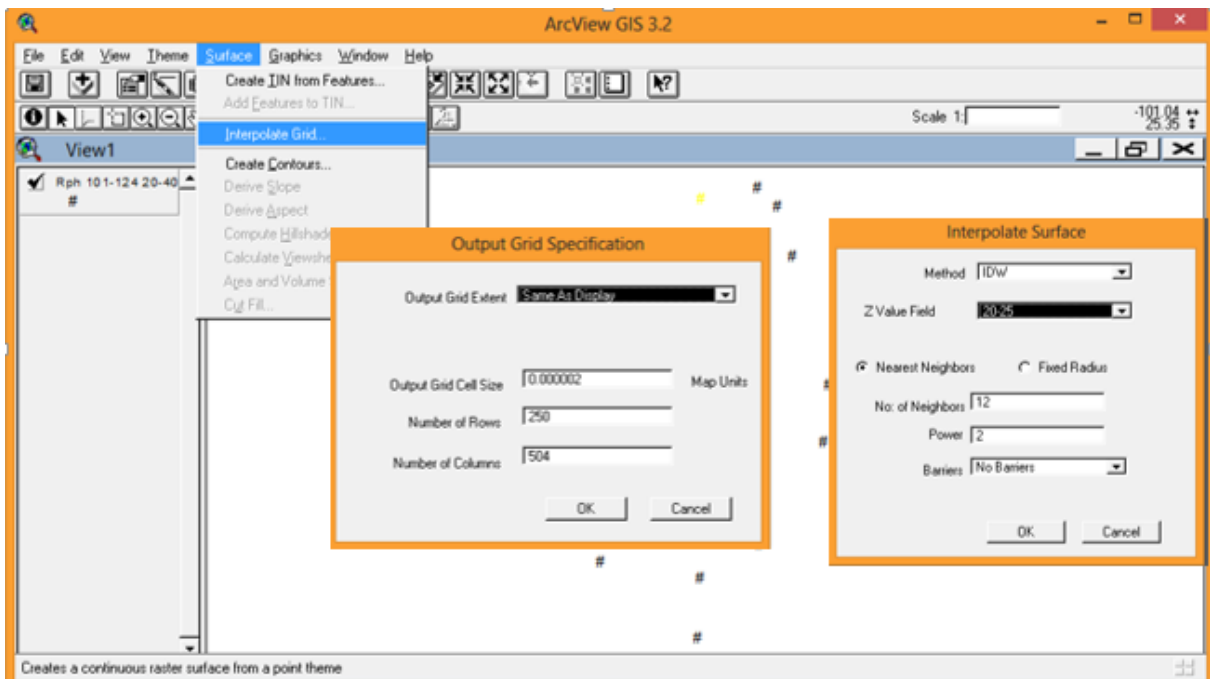
8. Nos abre el nuevo tema con nombre de la tabla, para visualizar los puntos habilitamos el recuadro que tiene.



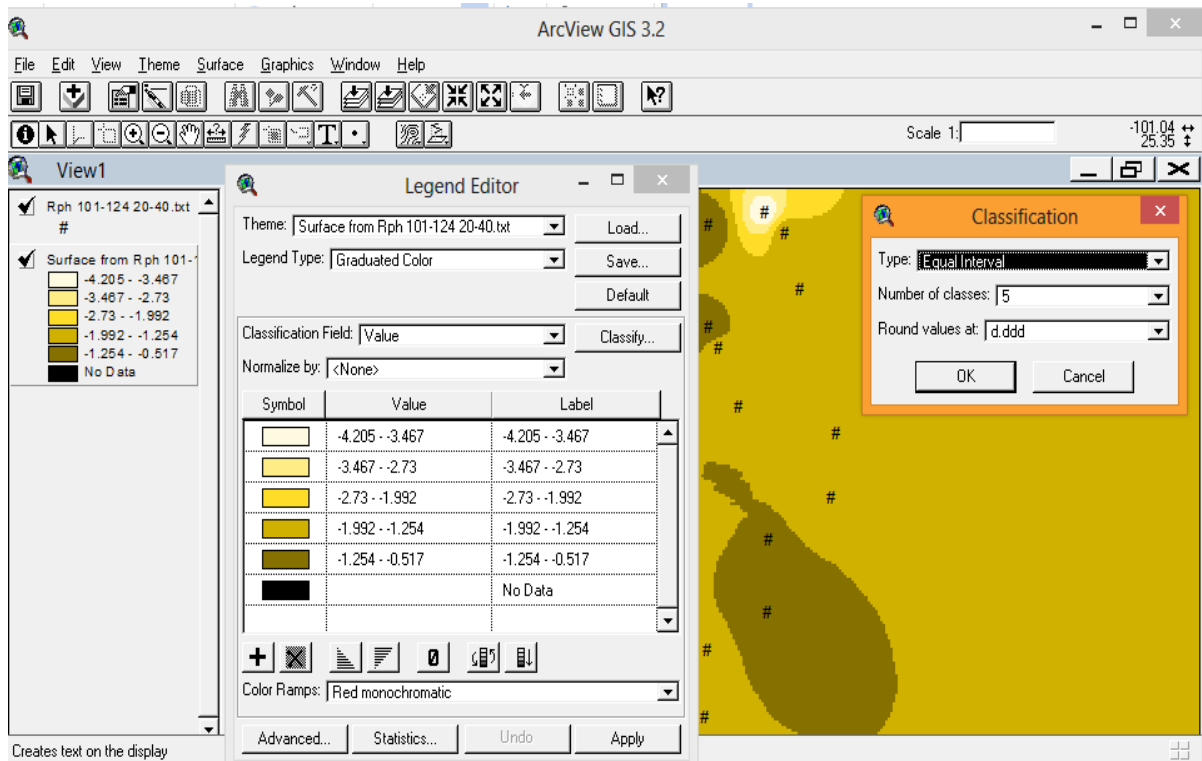
9. Para realizar la interpolación con función la resistencia a la penetración (20-25 cm), se activa la extensión 3D ANALISYS. Esto se hará File + Extensions + 3D ANALISYS + OK, listo aparecerá la extensión Surface.



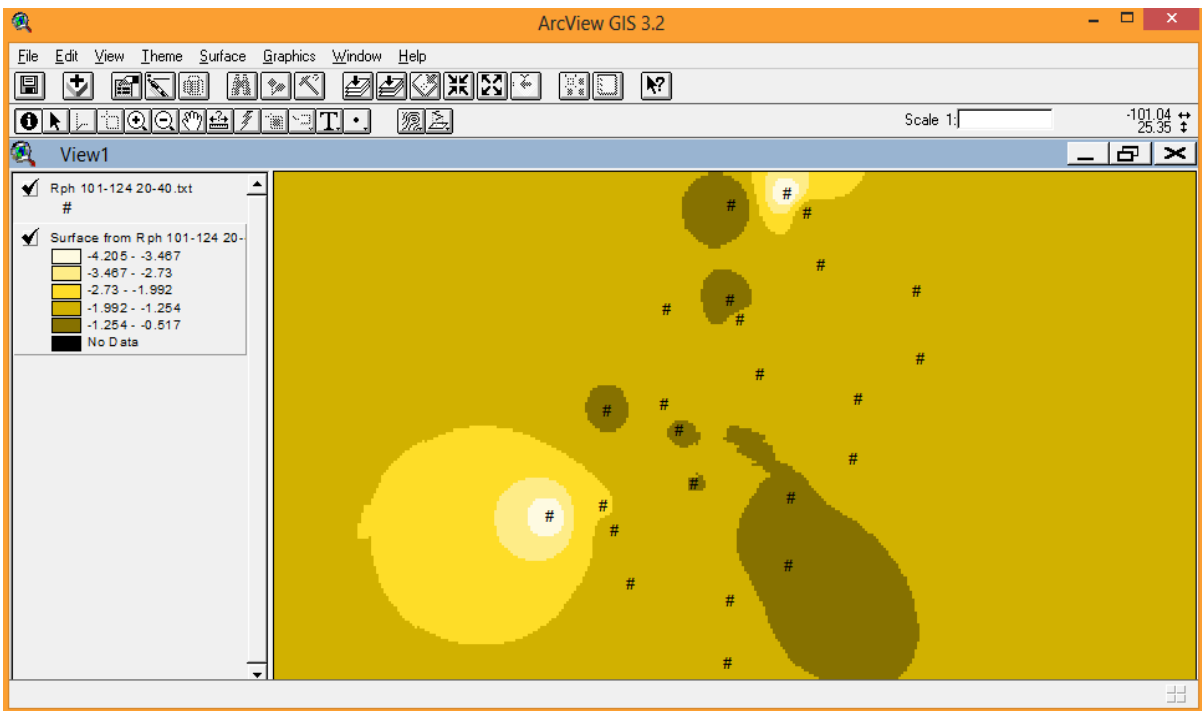
10. Con esta nueva extensión Surface + Interpolate Grid nos aparecerá una ventana “Output Grid Specification” en Output Grid Extent seleccionaremos Same As View al darle OK nos arroja una nueva ventana “Interpolate Surface” en ella seleccionamos en Method IDW y en ZValue Field 20-25cm y finalmente OK.



11. Nos generara un nuevo tema con la interpolación esta la llevaremos debajo del tema de puntos y la seleccionaremos para poder visualizar los dos temas. Para editar la interpolación se da doble clic en el tema de interpolación abre la ventana “Legend Editor” seleccionas Classify, abrirá Classification en Number of clases y Round values at seleccionamos la opción 5 y d.ddd respectivamente OK, finalmente seleccionas el color y se oprime Apply.



12. Al final queda visualizado de la siguiente manera.



Anexo B

9.2. Tabla de datos promediados para la resistencia a la penetración.

Cuadro 9.1. Datos promediados de la resistencia a la penetración del suelo con porcentaje de humedad promedio del 11.4% y 11.7%

Resistencia la penetración del suelo Humedad 1					
X	Y	MPa 20-25	MPa 25-30	MPa 30-35	MPa 35-40
-101.03611	25.35430	-2.32812	-2.58630	-2.63550	-2.59961
-101.03606	25.35438	-1.43958	-1.92769	-2.58161	-2.52733
-101.03597	25.35454	-3.69024	-4.20152	-3.74361	-2.87118
-101.03597	25.35453	-3.94492	-4.49736	-5.02144	-4.17644
-101.03601	25.35445	-2.99187	-3.68203	-3.06985	-2.42294
-101.03605	25.35438	-2.79742	-2.90602	-4.26737	-4.11523
-101.03610	25.35430	-3.96510	-5.60703	-5.55156	-4.64754
-101.03607	25.35432	-2.49666	-2.92750	-2.83089	-3.53716
-101.03603	25.35440	-3.02435	-3.15122	-2.83951	-2.78416
-101.03598	25.35446	-1.91973	-2.35435	-2.83348	-2.78892
-101.03594	25.35453	-1.48322	-2.39876	-3.19691	-2.64378
-101.03591	25.35452	-5.64994	0.00000	0.00000	0.00000
-101.03596	25.35444	-2.73301	-2.83496	-3.15213	-2.12277
-101.03600	25.35436	-2.76406	-2.98793	-3.99349	-4.66923
-101.03605	25.35429	-2.46968	-2.75661	-3.44094	-3.35018
-101.03604	25.35425	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
-101.03600	25.35433	-3.07388	-2.86647	-2.85850	-2.69780
-101.03595	25.35441	-4.67095	-4.14452	-3.78053	-3.52877
-101.03590	25.35449	-4.92029	-4.19083	-3.95188	0.00000
-101.03585	25.35445	-2.60394	-3.53554	-4.25686	-3.45531
-101.03590	25.35437	-4.64335	-4.09908	-3.63431	-4.36883
-101.03595	25.35430	-7.25485	0.00000	0.00000	0.00000
-101.03600	25.35422	-6.04634	-5.78954	-4.92506	-4.21987
-101.03597	25.35422	-4.17599	-4.48585	-4.31053	-3.35103
-101.03592	25.35429	-5.25642	-4.79707	-5.58564	-4.93335
-101.03588	25.35437	-5.02836	-3.94662	-4.32224	-5.05212

-101.03583	25.35445	-5.00726	-4.15303	-4.08935	-4.03851
-101.03582	25.35440	-3.27265	-4.27512	-5.15069	-4.15703
-101.03587	25.35433	-7.30117	0.00000	0.00000	0.00000
-101.03593	25.35426	-3.66050	-3.65804	-3.80147	-3.79610
-101.03597	25.35418	-4.11977	-5.93187	-4.83991	0.00000

Cuadro 9.2. Datos promediados de la resistencia a la penetración del suelo con porcentaje de humedad promedio del 14.3%.

Resistencia a la penetración del suelo Humedad 2					
X	Y	MPa 20-25	MPa 25-30	MPa 30-35	MPa 35-40
-101.03593	25.35414	-4.03080	-4.70417	0.00000	0.00000
-101.03589	25.35422	-1.05430	-0.97648	-1.04193	-1.60688
-101.03584	25.35430	-1.41982	-1.64604	-2.38028	-3.95799
-101.03579	25.35437	-0.51608	-0.58300	-0.77173	-0.89448
-101.03575	25.35438	-4.21523	-5.12850	-5.64610	-5.71759
-101.03579	25.35430	-0.99194	-1.05491	-1.42440	-1.39202
-101.03584	25.35423	-1.44522	-1.40451	-1.70652	-2.08775
-101.03589	25.35415	-2.03894	-2.01572	-2.87094	-3.57399
-101.03588	25.35413	-1.74625	-2.02408	-2.98776	-3.58187
-101.03583	25.35421	-1.18872	-1.28656	-1.36714	-1.84509
-101.03578	25.35429	-1.34398	-1.28700	-1.23818	-1.72256
-101.03573	25.35437	-1.37151	-1.41348	-1.35892	-1.49949
-101.03572	25.35433	-1.76940	-1.73578	-2.00531	-2.12904
-101.03577	25.35425	-1.27700	-1.18249	-1.04598	-0.90253

-101.03582	25.35417	-1.23296	-1.03957	-0.86261	-0.76796
-101.03587	25.35409	-1.59036	-1.46085	-1.63714	-1.63354
-101.03579	25.35408	-1.49308	-1.81829	-2.47762	-3.30561
-101.03574	25.35416	-1.22079	-1.17418	-1.32319	-1.91901
-101.03569	25.35423	-1.32968	-1.38951	-1.47326	-1.47656
-101.03564	25.35431	-1.83185	-1.97929	-2.99629	-3.12714
-101.03564	25.35426	-1.67472	-2.31704	-3.39999	-2.96910
-101.03569	25.35418	-1.47530	-1.84099	-1.79114	-0.98252
-101.03574	25.35411	-0.63561	-0.82762	-1.04142	-1.29559
-101.03579	25.35403	-1.25210	-1.77321	-1.97363	-2.30110

Cuadro 9.3. Datos promediados de la resistencia a la penetración del suelo con porcentaje de humedad promedio del 14.3%.

Resistencia a la penetración del suelo humedad 3					
X	Y	MPa 20-25	MPa 25-30	MPa 30-35	MPa 35-40
-101.03575	25.35405	-2.25403	-4.61087	-5.64938	0.00000
-101.03570	25.35413	-1.86789	-1.83531	-2.36318	-2.64723
-101.03566	25.35421	-1.50351	-1.77094	-2.21113	-2.55961
-101.03561	25.35428	-2.71608	-3.41944	-4.43387	-4.28860
-101.03560	25.35425	-2.16181	-2.87221	-3.44989	-3.28843
-101.03565	25.35417	-1.63167	-1.83954	-2.35611	-3.07281
-101.03570	25.35409	-1.60226	-2.16354	-2.84264	-2.74266
-101.03575	25.35401	-2.03261	-2.38534	-3.03687	-2.98532
-101.03550	25.35425	-2.59650	-2.44523	-2.98532	-2.97480
-101.03555	25.35417	-1.00621	-1.02746	-1.34330	-1.50264
-101.03560	25.35410	-1.22193	-0.99911	-0.90669	-0.98246

-101.03565	25.35402	-1.79775	-1.49497	-1.29528	-1.67833
-101.03567	25.35398	-2.59439	-3.79659	-5.22414	0.00000
-101.03562	25.35406	-1.05439	-0.99586	-1.12538	-1.57287
-101.03556	25.35414	-1.29603	-2.31666	-2.68180	-2.60782
-101.03552	25.35422	-0.80980	-0.75689	-0.70455	-0.83105
-101.03546	25.35423	-1.43702	-1.59262	-1.73322	-1.45966
-101.03551	25.35415	-2.08909	-1.81310	-1.87176	-2.11398
-101.03556	25.35407	-1.07615	-1.14135	-1.36298	-1.52576
-101.03560	25.35400	-1.25972	-1.25178	-1.22386	0.00000
-101.03546	25.35420	-0.99219	-1.09103	-1.57603	-1.55493
-101.03551	25.35413	-2.05785	-1.91111	-1.77711	-1.72419
-101.03555	25.35405	-1.28092	-1.31556	-1.48611	-1.69811
-101.03561	25.35397	-1.37167	-1.46545	-2.16253	-3.06909

Anexo C

La fórmula para obtener los datos en MPa se obtuvo de la siguiente manera

$$\text{MPa} = (\text{datos en campo} * 1000 * \text{área} * \text{constante de calibración})$$

En donde:

Datos en campo = volt

Área = 0.001053253 m²

Constante de calibración= 13.58 m VN⁻¹ (López 2012)

Para la generación de mapa en la resistencia a la roturación, en las coordenadas se ocupa la misma fórmula, lo que cambia son las dos variables a calcular, sensor 1=RojAm-Fx y sensor 2=VerAzu-Fx. Es decir, se realizan los mismos pasos para obtener los mapas con diferentes humedades.